

## РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ ДЕТЕКТОРА ИОНИЗИРУЮЩИХ ЧАСТИЦ

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

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

Одной из важных задач современной науки и техники является регистрация и видеоизображение различного вида излучений – от видимого света до частиц высоких энергий. Для их регистрации коротковолновых и ионизирующих излучений применяются монолитные и гибридные детекторы, которые отличаются по принципу действия, конструкции и технологии изготовления. В статье рассматривается новый тип квантового детектора, матрица которого содержит пиксели с функционально-интегрированными структурами. В работе проведены оценки быстродействия и чувствительности такого детектора. Показано, что он обладает высокой чувствительностью, высоким быстродействием и координатным разрешением. Это достигается путем применения оригинальной электрической схемы и конструкции пиксели. Показано, что для детекторов такого типа не требуется специальной внешней электроники. Детектор может быть непосредственно совмещен с компьютером.

Ключевые слова: интегральная схема, архитектура детектора, быстродействие, временное разрешение.

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

Murashev V. N., Legotin S. A., El'nikov D. S., Krasnov A. A.

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

Полупроводниковые детекторы хорошо известны почти 50 лет и широко применяются в ядерной физике. При этом наибольшее распространение получили полосковые (стриповые) координатные детекторы [3], которые, по сути, являются простейшими монолитными полупроводниковыми приборами на основе *p-i-n* диодов. Однако при их применении требуется использование специальной внешней электроники.

При этом отсутствие усилительных свойств в *p-i-n* диодах стриповых детекторов резко ограничивает их быстродействие и возможность одновременного измерения 2-х (3-х) координат, а наличие специальной электроники, подсоединяемой к каждой строке и столбцу, делает такие детекторы весьма громоздкими и дорогими.

Очевидным решением проблемы стало появление гибридных микросхем детекторов [2,4,5], созданных по технологии «флип-чип». В данном техническом решении реализуется

идея прямого соединения пикселей двух чипов (регистрирующего и считывающего): первого, принимающего излучение, содержащего матрицу детектирующих пикселей, и второго, имеющего матрицу пикселей, обладающих свойствами усиления и обработки сигналов.

Технология «флип-чип», в принципе, позволяет получить детекторы высокого качества, удовлетворяющие техническим требованиям, предъявляемых, например, к рентгеновским панелям медицинского и промышленного назначения.

Однако данной технологии присущ ряд недостатков, среди которых основными являются высокая стоимость и сложность изготовления детекторов, так как необходимо комплектовать в одной рентгеновской панели около 2 тыс. мегапиксельных чипов, при этом надо обеспечить прямое соединение миллионов пикселей (содержащих сотни транзисторов) регистрирующего и считывающего чипов. А дальнейшее повышение качества изображения за счет уменьшения размеров пикселей ведет к резкому усложнению конструкции детектора и надежности работы всего устройства.

Альтернативным конструктивно-технологическим решением, в котором совмещена регистрирующая и обрабатывающая части в единую интегральную схему СБИС [1].

Такое техническое решение устраняет главную проблему технологии «флип-чип», поскольку предполагается изготовление детектора в одной конструкции СБИС в едином технологическом маршруте. Однако разработка такого детектора СБИС является весьма сложной и многоплановой задачей, связанной с решением взаимосвязанных физических, технических и схемотехнических проблем.

Поэтому в работе проведены поисковые исследования по выбору архитектуры интегральной схемы детектора, оценка быстродействия и временного разрешения.

### **Архитектура и схемотехника квантового координатного детектора**

Для квантовых координатных детекторов оптимальна архитектура (блок-схема) построения, показанная на рис. 1.

Принцип действия квантового координатного детектора основан на измерении сигнала только в доминирующей пикселе детектора.

Квантовый детектор работает следующим образом. Попадание ионизирующей частицы в пикселю приводит к возникновению ионизационного тока в коллекторном *p-n* переходе, который усиливается биполярной структурой и поступает в соответствующие разрядные шины  $X_i$ ,  $Y_i$ . Сигналы с этих шин усиливаются импульсными усилителями, включенными по схеме «ИЛИ». Затем эти сигналы поступают на аналоговый выход микросхемы. Аналоговые сигналы, пропорциональные энергии частицы, поступают на выход микросхемы, а далее поступают на формирователь импульсов адреса пиксели и на шифратор, который кодирует в двоичный код номер строки (столбца).

Однако аналоговый сигнал такого детектора не дает точного измерения аналогового сигнала в случае прохождения ионизирующей частицы под большим углом к детектору, «приводящему» к размытию сигнала на несколько пикселей.

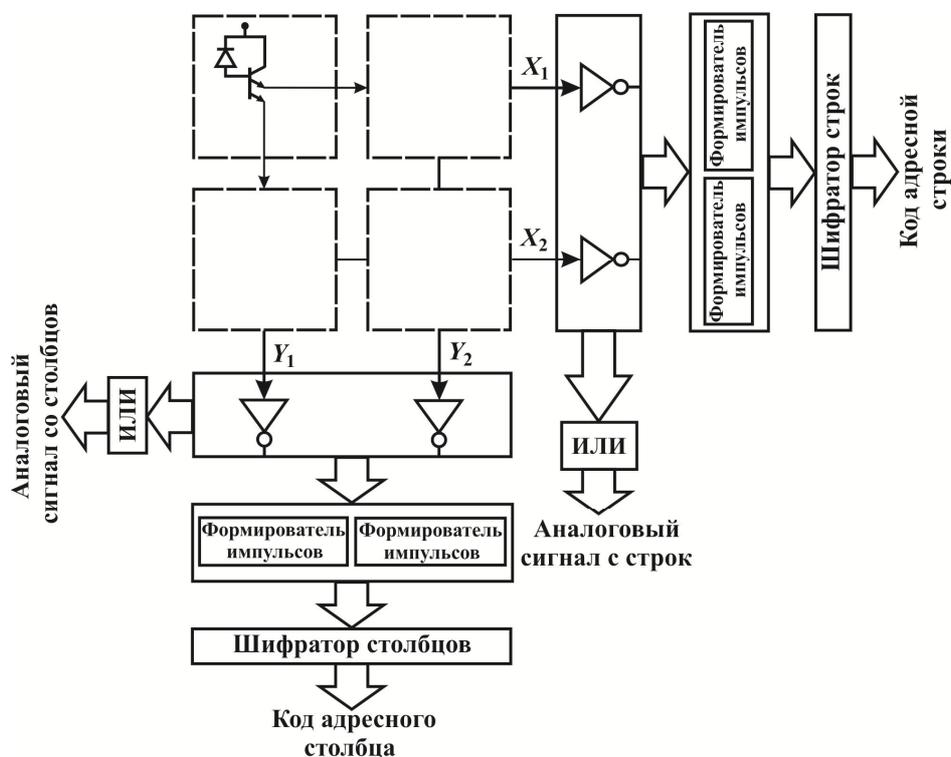


Рисунок 1 – Архитектура «быстрого» квантового координатного детектора

Недостатком таких квантовых координатных детекторов является возможность работы при мощности потока излучения не более  $P_x < 10^8$  квант/с·см<sup>2</sup>, что существенно ограничивает их область применения «малодозовыми» задачами.

### Архитектура и схемотехника аналогового детектора

Принцип действия аналогового детектора (рис. 3) основан на накоплении в конденсаторах пикселей информационного заряда, создаваемого потоком ионизирующих частиц.

Такой детектор способен работать при любой интенсивности излучения. Однако существенным недостатком является наличие ошибки, связанной с оцифровкой аналогового сигнала, и различие в спектре ионизирующих частиц.

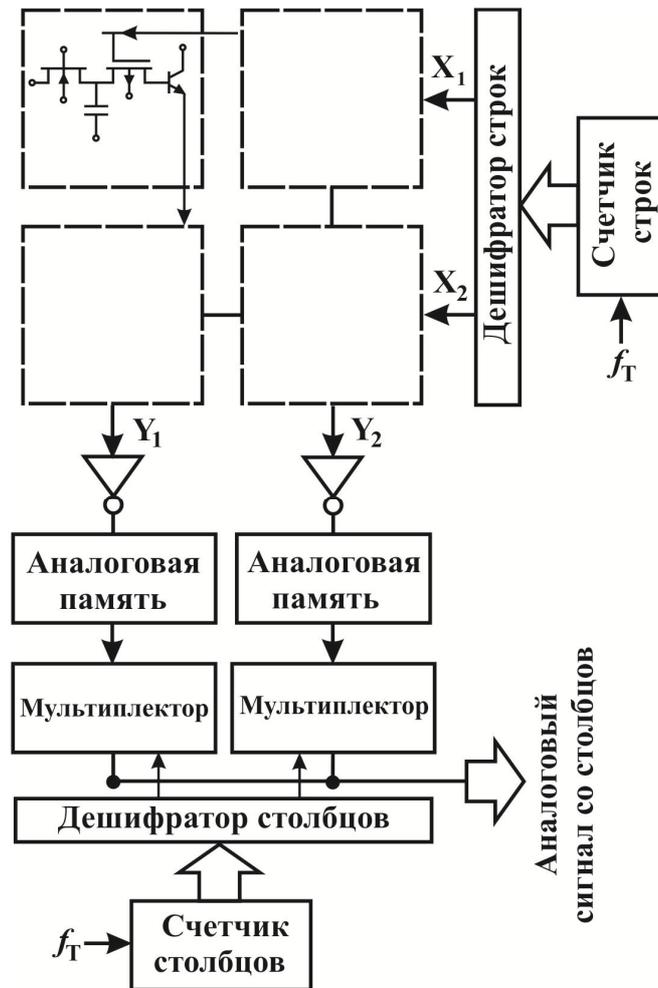


Рисунок 3 – Архитектура аналогового детектора

Аналоговый детектор работает следующим образом. Поступление ионизирующей частицы приводит к накоплению (или разрядке) заряда в конденсаторе пиксели детектора.

Аналоговые заряды в пикселях пропорциональны количеству и энергии поступивших в нее квантов. Они периодически считываются путем подключения дешифратора строк к матрице. Сигналы с разрядных шин  $Y$  запоминаются в аналоговой памяти и затем последовательно считываются дешифратором столбцов на выходе СБИС.

#### Архитектура и схемотехника квантово-цифрового детектора

Принцип действия квантово-цифрового детектора (рис. 4) основан на запоминании количества ионизирующих частиц в цифровой памяти пиксели матрицы детектора и последовательном опросе пиксели после или во время облучения.

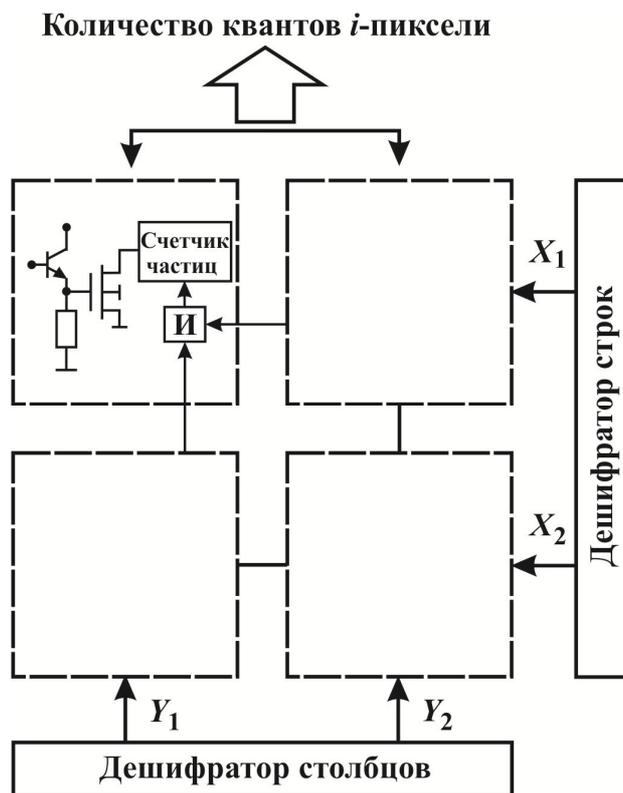


Рисунок 4 – Архитектура квантово-цифрового детектора

Квантово-цифровой детектор работает следующим образом. Поступающие ионизирующие частицы создают ионизационные токи в соответствующих пикселях, которые усиливаются импульсными усилителями этих пикселей. Импульсные усилители формируют импульсы, которые поступают на счетчик импульсов пикселей. Таким образом, в каждой пикселе детектора накапливается в цифровом виде информация о количестве поступивших в нее ионизирующих частиц. Затем после окончания (или во время) облучения счетчики пикселей матрицы детектора последовательно опрашиваются и эта информация передается в персональный компьютер.

Достоинством такого детектора является максимально высокая разрешающая способность, низкий уровень шумов, большой динамический диапазон.

Недостатком является сложность изготовления и невысокое координатное разрешение.

#### **Быстродействие, временное разрешение полупроводниковых детекторов**

Под быстродействием полупроводниковых детекторов подразумевается темп подачи информации от детектора во внешнюю линию связи (на компьютер).

Под временным разрешением понимается задержка появления (переднего фронта) сигнала на выходе детектора относительно времени прихода частицы.

Временное разрешение квантовых координатных детекторов фактически определяется временем нарастания переднего фронта ионизационного тока, который определяется временем пролета ионизирующей частицы через ОПЗ пиксельной структуры:

$$\tau_{др} = \frac{W_{опз}}{\mu E} = 10 \text{ нс};$$

$$\tau_{пр} = \frac{W_0^2}{D_n} = 0,1 \text{ нс}.$$

Быстродействие квантовых координатных детекторов определяется временем выборки информации о координатах ионизирующих частиц, которое, в основном, определяется постоянной времени матрицы пикселей:

$$\tau_c = (nC_{бэ})R_{тр} = (10^3 \cdot 10^{-15}) \cdot 10^4 = 10^{-8} \text{ с},$$

где  $n$  – число пикселей в строке (столбце), шт.;

$C_{бэ}$  – емкость  $p$ - $n$  перехода базы-эмиттер, Ф;

$R_{тр}$  – выходное сопротивление биполярной структуры, Ом.

Временная задержка усилителей считывания и формирования импульсного сигнала  $\tau_{yc} = 5 \text{ нс}$ .

Т.е. общее время равно

$$\tau_{\Sigma} = \tau_{др} + \tau_{пр} + \tau_c + \tau_{yc} = 10 \text{ нс} + 0,1 \text{ нс} + 10 \text{ нс} + 5 \text{ нс} \approx 25 \text{ нс}.$$

Таким образом, темп поступления информации или быстродействие квантовых координатных детекторов составляет  $10^8$  бит/с.

Соответственно для нормальной работы квантового координатного детектора темп поступления ионизирующих частиц не может превышать  $10^8$  бит/с.

Темп поступления частиц в аналоговый детектор может быть практически любым, а время поступления информационного сигнала определяется временем опроса матрицы. Например, для мегапиксельной матрицы

$$T_{\text{периода}} = (n_c m_c) t_{\text{выб.пиксели}} = (10^3 \cdot 10^3) \cdot 10^{-8} = 10^{-2} \text{ с},$$

где  $n_c$  – количество строк в матрице, шт.;

$m_c$  – количество столбцов в матрице, шт.;

$t_{\text{выб.пиксели}}$  – время выборки информационного сигнала с пиксели, с.

Темп поступления ионизирующих частиц в детектор не может превышать быстродействие входного усилителя и быстродействие первого триггера счетчика

импульсов, которое ( $\tau_{yc} \leq 5$  нс) существенно меньше времени сбора носителей заряда в ОПЗ пластины детектора ( $\tau_{др} = 10$  нс).

Учитывая, что темп поступления ионизирующих частиц, например рентгеновских квантов, при флюорографии не превышает  $P_x > 10^{12}$  квант/с·см<sup>2</sup> или в одну пикселию:

$$P_x/n = 10^8 \text{ квант/с} \cdot \text{см}^2 \quad (\text{при количестве пикселей равное } 10^4)$$

где  $n$  – число пикселей в детекторе, шт.

Таким образом, быстродействие чипа квантово-цифрового детектора площадью 1 см<sup>2</sup> определяется скоростью опроса памяти (счетчиков) пикселей, которое составляет

$$T_{\text{опроса}} = nkt_{\text{выб.пиксели}} = 10^4 \cdot 10 \cdot 10^{-8} = 10^{-3} \text{ с},$$

где  $k$  – число триггеров в пиксели, шт.

### **Заключение**

Рассмотрены принципы действия аналогового, координатного и квантово-цифрового детекторов, определены соответствующие им области применения.

Показано, что быстродействие квантового пиксельного координатного детектора в основном определяется постоянной времени разрядной шины ( $\tau_c \approx 10$  нс), временем сбора носителей заряда в области пространственного заряда коллекторного перехода ( $\tau_{др} \approx 10$  нс) и временной задержкой усилителей считывания и формирования импульсного сигнала ( $\tau_{yc} = 5$  нс), т.е. ( $\tau_{\Sigma} \approx 25$  нс).

Показано, что для детекторов такого типа не требуется специальной внешней электроники. Детектор может быть непосредственно совмещен с компьютером.

*Работа выполнена при поддержке ГК 14.515.11.0074 от 25.06.2013 г.*

### **Список литературы**

1. Мурашев В.Н., Леготин С.А., Юрчук С.Ю., «Координатный полупроводниковый детектор рентгеновского излучения на основе пиксельных матриц» // Датчики и системы, 2011, №1, с. 31–36
2. Amati M. et al: Nucl. Instrum. Methods A 511, 265–270 (2003).
3. Beaumont S.P. et al., «Gallium Arsenide Microstrip Detectors for Charged Particles», NIM A 321 (1992) 172.
4. Ehrmann O.: Private communication, Berlin, 2004.
5. Kucewicz W. et al: Acta Phys. Pol. B 30, 2075–2083 (1999).

**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.