

УДК 621.383.8

## ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ДОЗИМЕТРЫ НА ОСНОВЕ ПОЛЕВЫХ И ОДНОПЕРЕХОДНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

*Викулин И.М., Веремьева А.В., Горбачев В.Э., Марколенко П.Ю.*

*Одесская национальная академия связи им. А.С.Попова  
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.  
[physonat@gmail.com](mailto:physonat@gmail.com)*

## ВИСОКОЧУТЛИВІ ДОЗИМЕТРИ НА ОСНОВІ ПОЛЬОВИХ І ОДНОПЕРЕХІДНИХ ТРАНЗИСТОРІВ

*Вікулин І.М., Верем'єва Г.В., Горбачов В.Е., Марколенко П.Ю.*

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,  
65029, Україна, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.  
[physonat@gmail.com](mailto:physonat@gmail.com)*

## HIGHLY SENSITIVE DOSIMETERS BASED ON FIELD-EFFECT AND UNIJUNCTION TRANSISTORS

*Vikulin I.M., Veremjeva A.V., Gorbachev V.E., Markolenko P.Y.*

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,  
1 Kuznechna St., Odessa, 65029, Ukraine.  
[physonat@gmail.com](mailto:physonat@gmail.com)*

**Аннотация.** Экспериментально исследована возможность создания датчика радиации на основе измерительного моста из четырех полевых транзисторов. Использование в качестве сенсорных элементов полевых транзисторов позволяет увеличить чувствительность датчика, а мостовая схема их включения снижает уровень шумов до минимума. Комбинация четырех полевых транзисторов, два из которых с положительным знаком радиационной чувствительности, а два других с отрицательным, позволяет на порядок увеличить зависимость выходного напряжения в диагонали моста датчика от интенсивности облучения. Для улучшения помехозащищенности полезного сигнала при его дальнейшем усилении и устранения промежуточных АЦП при сопряжении датчика с цифровыми системами обработки информации в качестве датчика был использован генератор релаксационных колебаний на основе однопереходного транзистора с полевым транзистором в цепи эмиттера. Выходным параметром такого датчика является частота переменного сигнала в зависимости от интенсивности облучения.

**Ключевые слова:** дозиметр, полевой транзистор, ионизирующее облучение, однопереходный транзистор.

**Анотація.** Експериментально досліджена можливість створення датчика радіації на основі вимірювального моста з чотирьох польових транзисторів. Використання в якості сенсорних елементів польових транзисторів дозволяє збільшити чутливість датчика, а мостова схема їх з'єднання знижує рівень шумів до мінімуму. Комбінація чотирьох польових транзисторів, два з яких з позитивним знаком радіаційної чутливості, а два інших з негативним, дозволяє на порядок збільшити залежність вихідної напруги в діагоналі моста датчика від інтенсивності опромінення. Для поліпшення завадозахищеності корисного сигналу при його подальшому посиленні й усунення проміжних АЦП при спряженні датчика з цифровими системами обробки інформації в якості датчика був використаний генератор релаксаційних коливань на основі одноперехідного транзистора з польовим транзистором в ланцюзі емітера. Вихідним параметром такого датчика є частота змінного сигналу залежно від інтенсивності опромінення.

**Ключові слова:** дозиметр, польовий транзистор, іонізуюче опромінювання, одноперехідний транзистор.

**Abstract.** The possibility of making of the data unit of radiation on the basis of the bridge from four field-effect transistors has been observationally investigated. Use as sensory units of field-effect transistors allows to increase sensitivity of the detector, and the bridge-type of their connection decreases a noise level to a minimum. The combination of four field-effect transistors, two of which have a positive sign of radiation susceptibility, but others two have a negative sign, allows to obtain by order of magnitude greater the dependence of an output potential in a diagonal of a bridge of the detector from intensity of radiation. For improving of noise immunity of a desired signal at its further amplification and elimination of the intermediate analogue-digital converters at matching of the detector with numeral data reduction systems, the relaxation generator on the base of the unijunction transistor with the field-effect transistor in an emitter circuit has been used as sensitive element. The exit parameter of such detector is frequency of a variable signal depending on intensity of radiation.

**Key words:** detector, field-effect transistors, ionizing irradiation, unijunction transistor.

Действие всех разработанных датчиков радиации основано на эффекте ионизации продуктами ядерного распада (альфа, бета, гамма, нейтронного, рентгеновского) материала детектора.

Наиболее распространенные газовые детекторы, несмотря на высокую стойкость к радиационным нагрузкам, неудовлетворительно регистрируют  $\gamma$ -излучение и имеют слабое пространственное разрешение.

В твердотельных детекторах большая плотность полупроводника увеличивает потери энергии детектируемой частицы, что увеличивает диапазон регистрируемых энергий. Меньшая энергия ионизации полупроводника улучшает энергетическое разрешение. Высокая подвижность носителей заряда улучшает временное разрешение. Поэтому полупроводниковые детекторы радиации являются элементной базой современных диагностических систем атомных предприятий, геологоразведки, экологического мониторинга окружающей среды и медицинской техники. Однако, при отсутствии падающего излучения через полупроводниковый детектор всегда течет некоторый шумовой ток, а выходной сигнал с полупроводникового сенсора чрезвычайно мал, и его необходимо усиливать.

**Целью работы** является создание высокочувствительного полупроводникового датчика радиации с минимальным уровнем шумов, конструктивное решение проблемы помехозащищенности полезного сигнала при дальнейшем его усилении и сопряжении с цифровыми устройствами обработки информации.

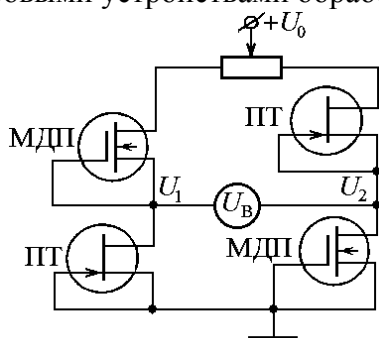


Рисунок 1 – Схема мостового датчика

В связи с этим, большой интерес представляет использование в качестве детекторов полевых транзисторов (ПТ) из-за их высокой чувствительности, а мостовая схема их включения снижает уровень шумов до минимума.

Классической схемой датчика является измерительный мост из четырех элементов, два из которых являются пассивными, а два других чувствительными к потоку радиации. Выходным параметром датчика является напряжение в диагонали моста, растущее с увеличением интенсивности облучения. При измерении уровней радиации в качестве активных элементов могут быть использованы полевые транзисторы (ПТ) при двухполюсном включении (затвор замкнут с истоком). Ток насыщения ПТ с  $p$ - $n$ -переходом в качестве затвора определяется как

$$I_n = A \cdot \mu \cdot n^2, \quad (1)$$

где  $A$  – постоянная;  $\mu$  – подвижность;  $n$  – концентрация носителей в канале. Под действием радиации в канале ПТ образуются дефекты, уменьшающие  $\mu$  и  $n$ , в результате чего ток уменьшается с ростом интенсивности облучения [1].

Для увеличения чувствительности мостового датчика с двумя ПТ и двумя

резисторами, вместо резисторов можно использовать два других ПТ, с противоположным знаком чувствительности, т. е. в данном случае ПТ, ток через которые растет при облучении (рис. 1). В этом качестве можно использовать некоторые ПТ с затвором МДП-типа (металл-диэлектрик-полупроводник). В таких ПТ при облучении диэлектрика, например  $\text{SiO}_2$ , в нем образуется положительный заряд, который увеличивает количество электронов в канале и ток через него увеличивается [2].

В эксперименте использовались промышленные ПТ типа 2П202Г (с *p-n*-переходом в качестве затвора) и МДП транзисторы КП306. Измерялся ток насыщения ПТ до облучения и после облучения гамма - квантами с энергией 1 МэВ. У транзисторов 2П202Г ток после облучения уменьшается в 1,5...2 раза (рис.2). Транзисторы КП306 разбивались на две группы. У первой, с током до облучения больше 3 мА наблюдалось также уменьшение тока, а у транзисторов с меньшим начальным током происходило увеличение тока в 1,5 ... 3 раза. Последняя группа и использовалась в схемах датчиков.

Для каждого датчика подбирались пары ПТ с близкими значениями тока до облучения. Эксперименты показали, что использование в схеме датчика четырех ПТ, два из которых с положительным знаком чувствительности, расположенных в противоположных по диагонали плечах моста, а два других с отрицательным, в остальных на порядок увеличивает чувствительность датчика к потоку излучения.

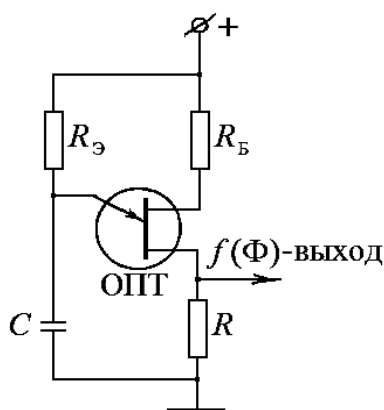


Рисунок 3 – Схема генератора релаксационных колебаний

При обработке сигнала с сенсора на ЭВМ предпочтительнее использовать сенсор, информационным параметром которого является частота выходного переменного сигнала, зависящая от интенсивности облучения [3]. Кроме того, частотно модулированный сигнал обладает повышенной помехозащищенностью при дальнейшем его усилении.

Однопереходный транзистор (ОПТ) представляет интерес для создания датчиков, как элемент, на основе которого действует наиболее простая схема генератора релаксационных колебаний (рис. 3). Конденсатор *C* заряжается через сопротивление  $R_3$  до напряжения включения  $U_B$  эмиттера, после чего ОПТ включается, конденсатор разряжается и процесс повторяется. Частота колебаний, в режиме  $I_3 = \text{const}$ , определяется как

$$f \approx \frac{I_3}{CU_B}, \quad (2)$$

а  $U_B = I_B \cdot r_{ББ}$ , где  $I_B$  – межбазовый ток,  $r_{ББ}$  – сопротивление модулируемой части базы [3].

Поскольку  $r_{ББ}$  пропорционально удельному сопротивлению материала базы  $\rho$ , то определение влияния радиации на  $U_B$  сводится к изменению  $\rho$  при облучении. Изменение  $\rho$  происходит при облучении базы электронами, гамма-квантами или быстрыми нейтронами. При этом возникающие в полупроводнике дефекты приводят к уменьшению концентрации основных носителей и их подвижности, а следовательно, и к росту  $U_B$ . На рис. 4 показана зависимость сопротивления базы промышленного ОПТ типа КТ117 из *n*-кремния с  $\rho = 200$  Ом·см от потока  $\Phi$  электронов с энергией 4 МэВ.

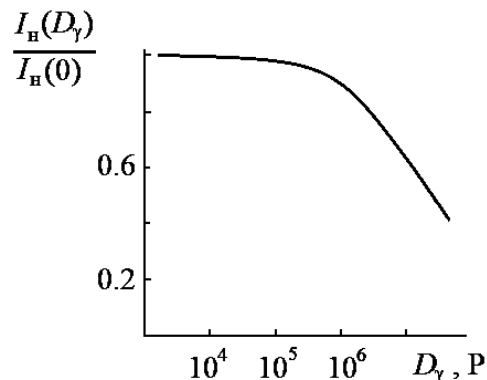


Рисунок 2 – Влияние облучения  $\gamma$ -квантами на изменение тока насыщения полевого транзистора

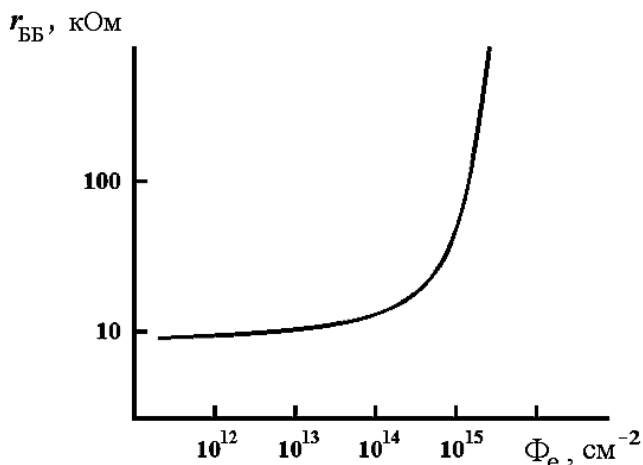


Рисунок 4 – Влияние потока электронов на сопротивление базы ОПТ

Аналогично изменяется величина  $U_B(\Phi)$  с увеличением  $\Phi$ . Соответственно частота колебаний  $f$  уменьшается с ростом  $r$  при увеличении интенсивности облучения базы. В указанном на рисунке интервале потоков излучения частота изменилась в 5...10 раз в зависимости от режимов питания.

Таким образом, генератор на ОПТ может использоваться в качестве датчика различных видов радиации, выходным параметром которого является частота сигнала как функция интенсивности потока электронов, гамма-излучения или нейтронов.

Для увеличения чувствительности датчика можно вместо  $R_3$  использовать рассмотренный выше ПТ с  $p-n$ -переходом

в двухполюсном включении. В этом случае при облучении одновременно с увеличением  $U_B$  уменьшается ток  $I_3$  через ПТ, что приводит к большему изменению частоты (2), а соответственно к повышению чувствительности датчика.

Экспериментальная проверка работы дозиметра была проведена с использованием промышленных ОПТ типа КТ117 и ПТ типа 2П202. Испытания показали, что радиационная чувствительность дозиметра на ОПТ с использованием ПТ увеличивается в 5...10 раз. Современная технология микроэлектроники позволяет изготавливать ОПТ и ПТ в виде одной твердотельной микросхемы.

В заключение отметим, что применение в качестве сенсорных элементов полевых транзисторов позволяет увеличить чувствительность датчика радиации, а мостовая схема их включения снижает уровень шумов до минимума. Комбинация четырех полевых транзисторов, два из которых с положительным знаком радиационной чувствительности, а два других с отрицательным, позволяет на порядок увеличить зависимость выходного напряжения в диагонали моста датчика от интенсивности облучения. У дозиметра, предложенного в схеме генератора релаксационных колебаний с однопереходным и полевым транзисторами в качестве чувствительных элементов, выходным параметром является частота переменного сигнала в зависимости от интенсивности облучения. Это, помимо высокой чувствительности, улучшает помехозащищенность полезного сигнала при его дальнейшем усилении и устраняет необходимость использования промежуточных АЦП при сопряжении датчика с цифровыми системами обработки информации.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Викулин И.М. Физика полупроводниковых приборов / И.М. Викулин, В.И. Стафеев. – М.: Радио и связь, 2000. – 270 с.
2. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники / [Кулаков В.М., Ладыгин Е.А., Шаховцов В.И. и др.] – М.: Радио и связь, 2001. – 135 с.
3. Викулин И.М. Частотные микроэлектронные сенсоры-преобразователи на основе однопереходных транзисторов / И.М. Викулин, Ш.Д. Курмашев, Л.Ф. Викулина, В.И. Стафеев // Радиотехника и электроника. – 2014. – Т.59. – № 3. – С. 296.

#### REFERENCES:

1. Vikulin I.M. Physics of semiconductor devices / I.M. Vikulin, V.I. Stafeev. – M.: Radio and communication, 2000. – 270 p.
2. Action of penetrating radiation on the electronic technique products / [Kulakov V.M., Ladygin E.A., Shahovtsov V.I. and other]. – M.: Radio and commun, 2001. – 135 p.
3. Vikulin I.M. Frequency microelectronic sensor-transformers based on unijunction transistor / I.M. Vikulin, S.D. Kurmashev, L.F. Vikulina, V.I. Stafeev // Radiotekhnica I electronica. – 2014. – V.59. – N 3. – P. 296.