

## **Установка измерения поглощенной дозы радиационного излучения на основе транзисторных сенсоров со структурой металл — диэлектрик — полупроводник**

© В.В. Андреев, А.А. Столяров, И.В. Соловьев

Калужский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

*Представлено описание установки измерения поглощенной дозы радиационного излучения. Показана возможность использования полевых транзисторов со структурой металл — диэлектрик — полупроводник в качестве компактных сенсоров радиации. Приведено описание метода определения поглощенной дозы с использованием сдвига порогового напряжения в результате облучения. Рассмотрены методы повышения температурной стабильности измеряемых характеристик.*

**Ключевые слова:** радиационное облучение, поглощенная доза, пороговое напряжение, МДП-сенсор.

В современной микроэлектронике в качестве ключевых, усилительных элементов широкое применение нашли полевые транзисторы со структурой металл — диэлектрик — полупроводник (МДП-транзисторы). Кроме того, полевые транзисторы могут применяться в качестве полупроводниковых накопительных датчиков радиационного облучения.

МДП-транзисторы обладают достаточно сильной чувствительностью к облучению и могут использоваться как накопительные дозиметры ионизирующего излучения [1–4]. Под действием радиации в объеме диэлектрика и на границе раздела диэлектрик — полупроводник проходят процессы ионизации. Радиоактивная частица генерирует электронно-дырочные пары в объеме диэлектрика. В связи с большей подвижностью, чем у дырок, электроны покидают диэлектрик через контакты. Дырки малоподвижны. Под действием внешнего электрического поля происходит процесс дрейфа дырок к затвору или подложке (в зависимости от полярности приложенного напряжения). На границе с полупроводником локализованы ловушки, способные захватывать дырки. Ловушки образуются из-за внутренних структурных нарушений диэлектрика и границы раздела с полупроводником. При этом изменяется зарядовое состояние диэлектрика, приводящее к сдвигу порогового напряжения транзистора. При положительной полярности затвора в процессе облучения вблизи границы раздела полупроводника — диэлектрика накапливается положительный заряд, что связано с захватом положительно заряженных дырок на ловушках в диэлектрике и влияет на пороговое напряжение. Многие виды радиационного излучения вызывают процессы ионизации

в диэлектрике с однотипной реакцией на облучение [5, 6]. Сдвиг порогового напряжения является информативным показателем, характеризующим поглощенную дозу ионизирующего излучения.

Пороговое напряжение МДП-транзистора с индуцированным каналом обычно измеряется как напряжение на затворе при некотором заданном токе стока. Данное напряжение определяет минимально допустимое значение напряжения питания, уровень токов потребления, помехозащищенность. Потребление энергии микросхемами в неактивном состоянии определяется значениями подпорогового тока и порогового напряжения. Она отражает экономичность микросхем, время работы приборов от аккумуляторов и батарей.

Существует несколько методов, с помощью которых можно получить значение порогового напряжения МДП-транзисторов:

*Метод экстраполяции, подбора по значению тока стока*, точечный. Состоит в достраивании передаточной характеристики до пересечения с осью абсцисс (при нулевом токе стока). Для проведения измерений необходимо знать определенные характеристики транзистора, параметры подложки, диэлектрика. Величину порогового напряжения можно рассчитать, используя характеристики в области плавного канала или отсечки. Ток стока в общем идеальном случае [7] может быть представлен следующими уравнениями:

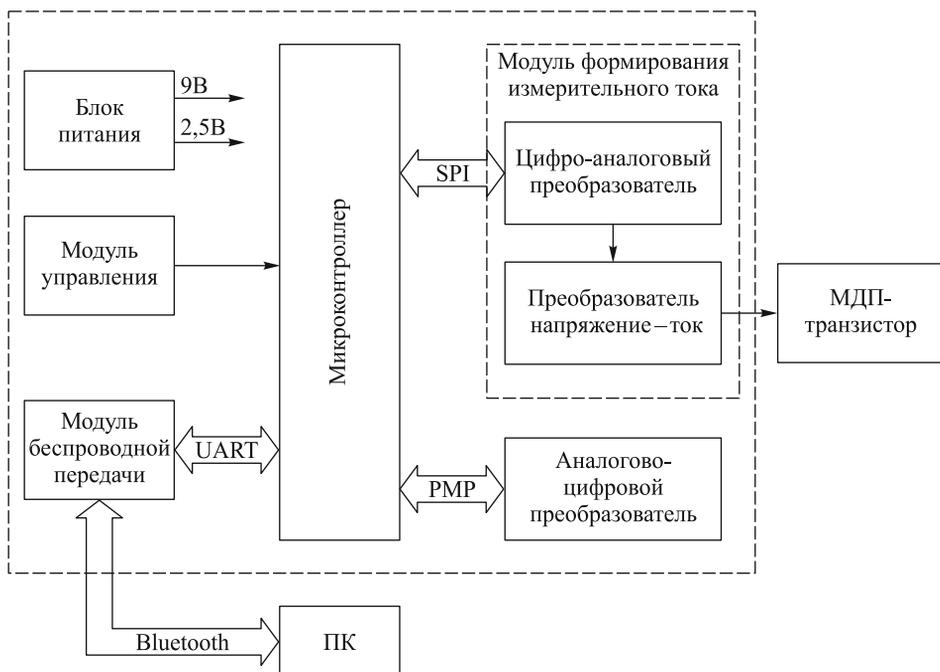
$$I_D = \begin{cases} 0 & \text{при } U_{GS} < U_{TH} \\ KU_{DS} \left( U_{GS} - U_{TH} - \frac{U_{DS}}{2} \right) & \text{при } U_{GS} \geq U_{TH}, 0 \leq U_{DS} < U_{GS} - U_{TH}; \\ \frac{K}{2} (U_{GS} - U_{TH})^2 & \text{при } U_{GS} \leq U_{TH}, U_{DS} \geq U_{GS} - U_{TH} \end{cases}$$

где  $I_D$  — ток стока;  $U_{GS}$  — напряжение между истоком и затвором транзистора;  $U_{TH}$  — пороговое напряжение;  $K$  — крутизна;  $U_{DS}$  — напряжение сток-исток.

*Метод подбора порогового напряжения по значению тока стока* заключается в получении выходных вольт-амперных характеристик полевого транзистора. Искомое напряжение определяется итеративным подбором напряжения на затворе и поддержанием постоянного напряжения на стоке. Процесс итерации завершается, когда ток стока достигает определенной заранее величины.

В *точечном методе* определения порогового напряжения используют ток стока небольшой амплитуды, близкий к оси абсцисс на передаточной характеристике полевого транзистора. Для проведения измерений электроды затвора и стока транзистора заземляют. К истоку полевого транзистора с индуцированным каналом подключают

источник тока, формирующий измерительный пороговый ток. Сигнал напряжения между истоком и затвором будет соответствовать пороговому напряжению транзистора. К преимуществам точечного метода можно отнести относительную простоту схем измерения, обеспечивающих высокую скорость определения параметра. Именно на этом методе основана работа установки измерения накопленной дозы, что позволило создать устройство с небольшими массогабаритными показателями и широкими возможностями автоматизации измерений. Структурная схема установки приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Структурная схема установки измерения поглощенной дозы радиационного излучения на основе транзисторных сенсоров со структурой металл — диэлектрик — полупроводник: SPI, PMP-шины; UART-интерфейс

Транзистор, параметры которого надо измерить, подключают к считывающему устройству, состоящему из нескольких модулей. Основным управляющим элементом схемы является микроконтроллер PIC18F4550. Для задания необходимого режима работы транзистора, в установке предусмотрен модуль формирования измерительного тока, содержащий цифро-аналоговый преобразователь ЦАП и преобразователь напряжение — ток.

По шине SPI в модуль передаются команды для ЦАП на формирование определенного напряжения, которое далее подается на вход преобразователя напряжение - ток. В точечном методе измерения порогового напряжения исток транзистора необходимо подключать к

источнику тока. Это требование как раз и выполняет модуль формирования измерительного тока, реализуя управляемый источник с помощью схем на операционных усилителях. Величина измерительного тока на выходе пропорциональна значениям управляющего напряжения. Разрядность ЦАП составляет 12 бит, что позволяет достаточно точно управлять напряжением и выбирать ток, подаваемый в транзистор, в диапазоне 10...200 мкА.

Для обеспечения температурной стабильности проводимых измерений значения тока должны удовлетворять нескольким условиям: быть близкими к минимальному значению тока стока на передаточной характеристике транзистора, а также к точке нулевого температурного коэффициента.

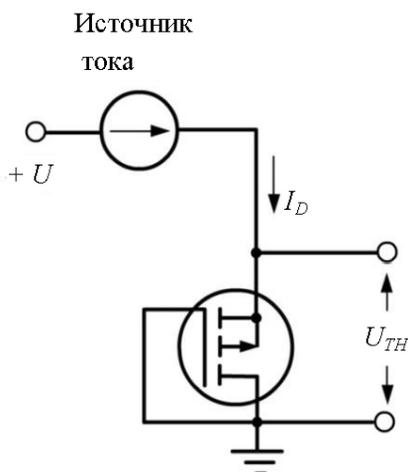
Изменение температуры вносит дополнительную погрешность в измеряемые значения порогового напряжения, оказывает влияние на удельную крутизну МДП-транзистора. Температурный коэффициент тока стока можно определить, используя зависимость [7]

$$\frac{dI_D}{I_D dT} = \frac{dK}{K dT} - \frac{2}{U_{GS} - U_{TH}} \cdot \frac{dU_{TH}}{dT},$$

где  $T$  — температура.

Удельная крутизна убывает с ростом температуры, поскольку температура зависит от подвижности носителей заряда. Температурный коэффициент удельной крутизны так же, как и порогового напряжения, отрицателен. Температурный коэффициент тока стока может принимать положительные или отрицательные значения. Это определяется знаменателем дроби, в котором присутствует разность. В температурной компенсационной точке температурный коэффициент равен нулю. Определить точку нулевого температурного коэффициента и настроить измерительную установку в соответствии с полученными результатами можно с помощью переходных вольт-амперных характеристик конкретных МДП-транзисторов, которые позволяет получить разработанная установка. Используя измерительный ток истока, близкий к точке нулевого температурного коэффициента, можно обеспечить температурную стабильность проводимых измерений. Созданный модуль формирования измерительного тока обеспечивает точность формируемого выходного параметра в  $1 \pm 0,2$  мкА.

При проведении измерений электроды затвора и стока транзистора заземляют. Схема подключения представлена на рис. 2. После формирования требуемого измерительного тока между стоком и истоком искомого пороговому напряжению будет соответствовать напряжение между истоком и затвором. Данное напряжение считывается с помощью 14-битного аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) и передается в микроконтроллер по шине РМР для последующей обработки.



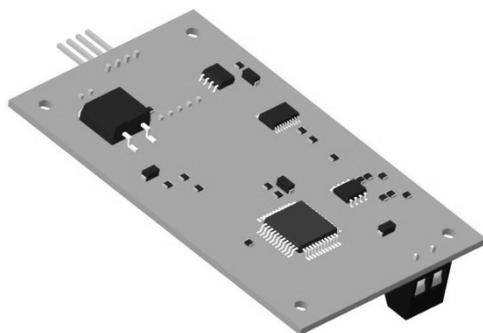
**Рис. 2.** Схема измерения порогового напряжения МДП-транзистора с каналом  $p$ -типа

Питание устройства осуществляется аккумуляторным источником питания с напряжением 9 В для снижения уровня помех в питающей цепи. Для потребителей в системе данное напряжение преобразуются в стабилизированное напряжение 5 В и опорное напряжение 2,5 В, необходимое для работы ЦАП и АЦП.

Связь измерительной установки с персональным компьютером осуществляется с помощью модуля беспроводной передачи. В нем используется Bluetooth приемо-передатчик BCD110 с возможностью соединения в беспроводную сеть до четырех устройств. Взаимодействие модуля с управляющим микроконтроллером осуществляется по интерфейсу UART. После установления соединения данные между персональным компьютером и прибором передаются по стандартному интерфейсу COM-порта. Управляющая программа ПК создана в графической среде разработки LabView.

### Основные характеристики установки

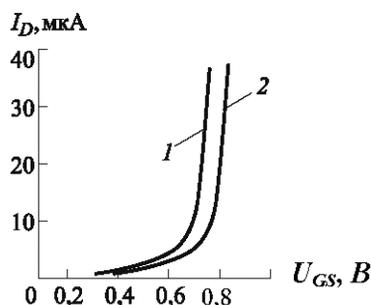
Управляющий микроконтроллер .....	PIC18F4550
Частота микроконтроллера, МГц .....	20
Интерфейс взаимодействия с ПК .....	RS232
Организация беспроводной сети .....	Bluetooth
Напряжение питания, В .....	9
Разрядность, бит:	
АЦП .....	14
ЦАП .....	12
Диапазон выходных измерительных токов, мкА .....	0...250
Точность формирования измерительных токов, мкА ...	0,2
Точность определения порогового напряжения, мВ ....	1
Габаритные размеры установки, мм .....	50×70×20
Масса, г .....	150



**Рис. 3.** Трехмерная модель печатной платы установки

На рис. 3 приведена трехмерная модель печатной платы установки.

Разработанная установка позволяет получать как точечные значения напряжений затвор-истока, так и функциональные зависимости тока стока от напряжения, которые представляются в графическом виде. На рис. 4 представлена передаточная вольт-амперная характеристика, полученная на установке для тестовых полевых транзисторов с каналом *p*-типа.



**Рис. 4.** Передаточная вольт-амперная характеристика тестового МДП-транзистора с каналом *p*-типа:

1 — до облучения; 2 — после гамма-облучения (поглощенная доза 1000 рад)

Пересчет сдвига порогового напряжения может осуществляться с использованием как калибровочных зависимостей, так и математических моделей смещения порогового напряжения в зависимости от накопленной дозы, например, модели Митчелла [8].

В заключение следует отметить, что полевые транзисторы со структурой металл — диэлектрик — полупроводник могут использоваться в качестве датчиков накопленной дозы радиации. Небольшие размеры сенсоров и установок считывания позволяют создать компактные дозиметры для применения в системах, предъявляющих повышенные требования к массогабаритным параметрам приборов, таких как летательные аппараты. Температурная зависимость показаний датчиков может быть

уменьшена при использовании измерительного тока, близкого к точке нулевого температурного коэффициента транзисторного сенсора.

Работа выполнена в рамках реализации проектов министерства образования и науки РФ, а также при финансовой поддержке РФФИ и администрации Калужской области (грант № 12-02-97533).

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Перевертайло В.Л. Датчики интегральной поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе МОП–транзисторов. *Технология конструирования в электронной аппаратуре*, 2010, №5, с. 22–29.
- [2] Андреев В.В., Бондаренко Г.Г., Лычагин А.А., Столяров А.А., Ульянов С.Е. Радиационная ионизация в структурах металл — диэлектрик — полупроводник в режиме сильнополевой инжекции электронов. *Физика и химия обработки материалов*, 2006, № 6, с. 19–23.
- [3] Andreev V.V., Bondarenko G.G., Mihal'kov A.M., Stolyarov A.A., Solov'ev I.V. Improvement of Injection and Radiation Stability of Nanosize Dielectric Films of MOS Devices. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2011, vol. 2, no. 5, pp. 425–427.
- [4] Андреев В.В., Столяров А.А., Васютин М.С., Михальков А.М. Активный чувствительный элемент сенсора радиационных излучений на основе МДП-структур с наноразмерными диэлектрическими слоями. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2010, с. 118–127.
- [5] Holmes-Siedle A. The Space-Charge Dosimeter: general principles of a new method of radiation detection. *Nucl. Inst. And Meth.*, 1974, vol.121, pp. 169–179.
- [6] Holmes-Siedle A., Adams L. *Handbook of Radiation Effects*. Oxford, Oxford University Press, 2002, 644 p.
- [7] Тице У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. Москва, ДМК Пресс, 2008, 832 с.
- [8] Mitchell J.P. Radiation-Induced Space-Charge Buildup in MOS Structures. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1967, no. 11, pp. 764–774.

Статья поступила в редакцию 18.12.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Андреев В.В., Столяров А.А., Соловьев И.В. Установка измерения поглощенной дозы радиационного излучения на основе транзисторных сенсоров со структурой металл — диэлектрик — полупроводник. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. № 1.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/hidden/1197.html>

**Андреев Владимир Викторович** родился в 1963 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1988 г. Д-р техн. наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой "Конструирование и производство электронной аппаратуры" МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал. Автор более 160 научных публикаций. Область деятельности и научные интересы: приборостроение, микро- и нанoeлектроника, физика конденсированного состояния, методы контроля. e-mail: andreev@bmsu-kaluga.ru.

**Столяров Александр Алексеевич** родился в 1956 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1979 г. Д-р техн. наук, профессор, заместитель директора по научной работе Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область деятельности и научные интересы:

приборостроение, микро- и нанoeлектроника, физика конденсированного состояния, методы контроля. e-mail: alalstol@mail.ru.

**Соловьев Илья Викторович** — аспирант кафедры "Конструирование и производство электронной аппаратуры" МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал. Область деятельности и научные интересы: приборостроение, микро- и нанoeлектроника, физика конденсированного состояния, методы контроля. e-mail: solo1511@yandex.ru.