

## ДИАГНОСТИКА ДЕФЕКТОВ ЯЧЕЕК ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ МЕТОДОМ ЗОНДА КЕЛЬВИНА

© В. Ф. Лукичев<sup>1</sup>, Ю. Л. Шиколенко<sup>2</sup>, С. И. Нестеров<sup>3</sup>, Е. В. Сергеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Физико-технологический институт РАН (ФТИАН РАН),  
117218, г. Москва, Нахимовский пр-т, 36/1

<sup>2</sup>Московский государственный университет информационных технологий,  
радиотехники и электроники (МИРЭА), 119454, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78

<sup>3</sup>ЗАО «НТ-МДТ», 124482, г. Москва, г. Зеленоград, Корпус 100

На основе анализа компьютерной модели ячейки памяти и практических результатов измерений установлена зависимость поверхностного потенциала от уровня заряда на плавающем затворе. Определена чувствительность измерений методом зонда Кельвина. Предложен способ диагностики эффекта избыточного накопления основных/неосновных носителей заряда в ячейках энергонезависимой памяти методом зонда Кельвина.

**Ключевые слова:** метод зонда Кельвина, энергонезависимая память, поверхностный потенциал

**Сведения об авторах:** Лукичев Владимир Федорович, lukichev@ftian.ru; Шиколенко Юрий Леонидович, binomhome@yandex.ru; Нестеров Сергей Иванович, nesterov@ntmdt.ru; Сергеев Евгений Владимирович, captainjackv@gmail.ru

## NONVOLATILE MEMORY CELLS DEFECTS DIAGNOSTIC BY KELVIN PROBE METHOD

V. F. Lukichev<sup>1</sup>, Yu. L. Shikolenko<sup>2</sup>, S. I. Nesterov<sup>3</sup>, E. V. Sergeev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Physics and Technology Russian Academy of Sciences (FTIAN),  
117218, Moscow, Nakhimovsky prospect, 36/1

<sup>2</sup>Moscow State University of Information Technologies, Radioengineering and Electronics,  
119454, Moscow, prospect Vernadskogo, 78

<sup>3</sup>ZAO «NT-MDT», 124482, Moscow, Zelenograd, Bd. 100

The relationship between surface potential and floating-gate charge level was determined as a result of memory cell computer model analysis and the analysis of practical results of measurements. Sensitivity of measurements was determined by the Kelvin probe method. Kelvin probe method was suggested as a method for the diagnostic of majority/minority charge carriers' excessive accumulation effect in memory cells of non-volatile memory.

**Keywords:** kelvin probe method, nonvolatile memory, surface potential

**Data of authors:** Lukichev Vladimir Fedorovich, lukichev@ftian.ru; Shikolenko Yuriy Leonidovich, binomhome@yandex.ru; Nesterov Sergey Ivanovich, nesterov@ntmdt.ru; Sergeev Evgeniy Vladimirovich, captainjackv@gmail.ru

### Введение

Практически во всех современных многофункциональных ИМС ключевую роль играет интегрированная энергонезависимая память

на основе хранения заряда. Основными критериями качества ячеек памяти является надёжность и время хранения информации.

Повышения надёжности ячеек памяти возможно добиться без проведения глубокого

анализа причин и механизмов возникновения отказов. В статье предложен способ диагностики эффекта избыточного накопления основных/неосновных носителей заряда на плавающем затворе (ПЗ) ячейки памяти двухтранзисторного типа методом зонда Кельвина (МЗК).

### Исследование дефектов ячеек энергонезависимой памяти

Ячейка памяти во время эксплуатации подвергается воздействию электрических полей, что способствует усилению деградиационных процессов и может привести к изменению заряда на плавающем затворе. Неконтролируемое изменение заряда на плавающем затворе в большую или меньшую сторону может стать причиной смещения уровня порогового напряжения транзистора и привести к ошибкам при интерпретации хранимой информации. Одной из причин такого изменения может быть эффект избыточного накопления основных/неосновных носителей заряда в ячейках, который может быть спровоцирован дефектами оксида и нежелательными примесями [1].

Таким образом, для диагностики дефекта подобного рода необходима оценка уровня заряда на ПЗ ячейки памяти. Вследствие высокой сложности прямого измерения уровня заряда на ПЗ предложено оценить его поведение по результатам измерения электрофизических параметров, на которые заряд оказывает влияние. Одним из таких параметров является уровень поверхностного потенциала в непосредственной близости от ПЗ.

Исследование зависимости поверхностного потенциала от уровня заряда на ПЗ проведено с использованием компьютерного моделирования. В САПР ISE TCAD на основе данных о структуре ячейки памяти построена её модель, позволяющая оценить уровень поверхностного потенциала в точке интереса при различном уровне заряда на ПЗ. Геометрические параметры ячейки памяти получены в ходе анализа поперечного сечения образца.

На основе модели ячейки памяти двухтранзисторного типа проведены расчёты распределения поверхностного потенциала под областью ПЗ при отсутствии напряжения на управляющем затворе (УЗ) и двух уровнях заряда на ПЗ (рис. 1).

Результаты моделирования показывают, что уровень заряда на ПЗ оказывает влияние на поверхностный потенциал в непосредственной близости от ПЗ. Разность уровня поверхностного потенциала для ячейки с зарядом на ПЗ  $q \approx 0$  Кл и ячейки с зарядом  $q \approx -1,4 \cdot 10^{-14}$  Кл составила 100 мВ.

Измерение поверхностного потенциала в точке интереса можно провести методом зонда Кельвина. Метод основан на регистрации напряжения, необходимого для компенсации колебаний зонда кантилевера, вызванных полем поверхностного потенциала на исследуемом образце [2]. Для оценки практических возможностей МЗК по исследованию ячеек памяти определим чувствительность измерений метода.

Чувствительность измерений МЗК позволяет оценить при какой разнице поверхностных потенциалов двух точек можно

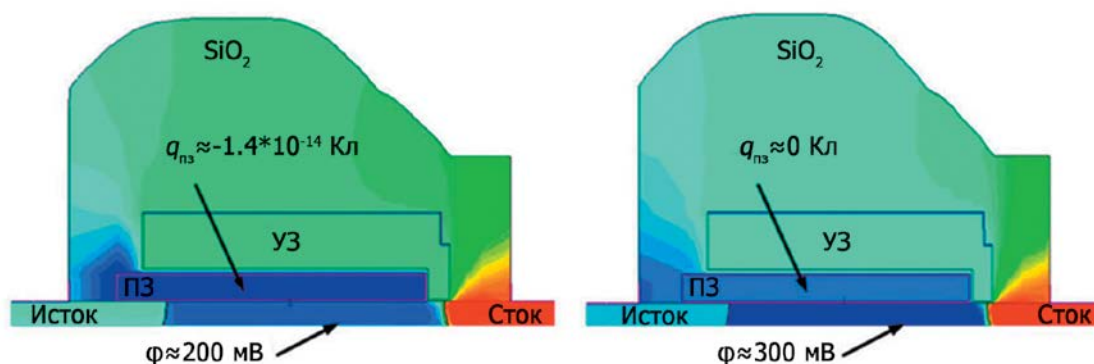


Рис. 1

Распределение поверхностного потенциала при различном уровне заряда на ПЗ

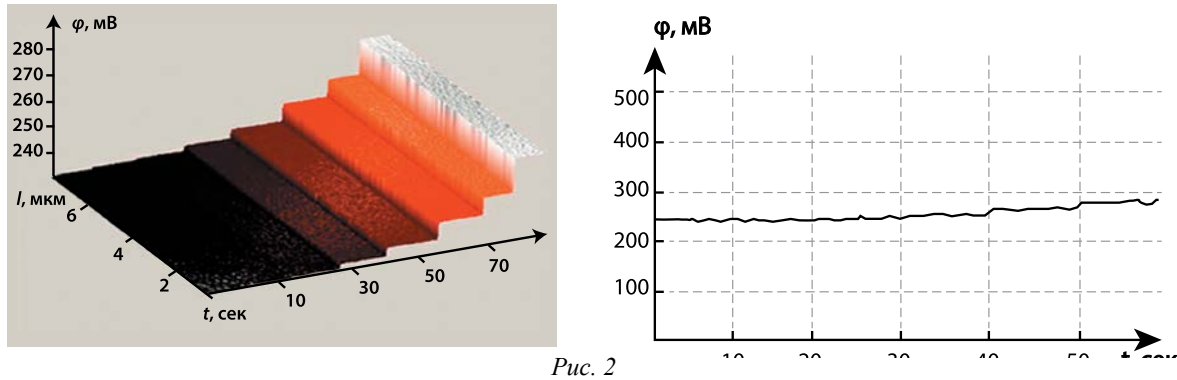


Рис. 2

### Распределение уровня поверхностного потенциала и его профиль

различить их значение. Для определения чувствительности МЗК на графитовую пластину от источника через изготовленный делитель напряжения подавалось постоянное напряжение с различными значениями.

При каждом значении напряжения на графитовой подложке с интервалом 10 секунд МЗК проводилось измерение значения поверхностного потенциала в одной точке. Таким образом, было получено распределение уровня поверхностного потенциала во времени и построен его профиль при различном значении постоянного напряжения на образце (рис. 2).

Среднеквадратическое отклонение ( $S$ ) величины измеряемого поверхностного потенциала, при уровне постоянного напряжения на образце 41 мВ, составило 12 мВ. Величина  $S$  сопоставима с уровнем собственных шумов измерительной системы. Разницу между уровнями поверхностного потенциала удалось зафиксировать на 30 секунде, при изменении подаваемого напряжения на образец с 25 мВ на 41 мВ. Следовательно, можно утверждать, что чувствительность измерений МЗК составляет 16 мВ.

Сравнив значения полученной чувствительности измерений МЗК и величину  $S$ , можно сделать вывод, что чувствительность измерений метода зонда Кельвина не может быть лучше уровня собственных шумов измерительной системы. Таким образом, чувствительность измерений МЗК, равная 16 мВ, удовлетворяет необходимым условиям для исследования данного типа ячеек памяти.

Исследование уровня поверхностного потенциала в непосредственной близости

от ПЗ методом зонда Кельвина проведено на образце, подготовленном с применением технологии химико-механической планаризации и жидкостного травления кремния в 80 % растворе тетраметил гидроксид аммония в пропаноле [3].

Методом зонда Кельвина получен профиль распределения величины поверхностного потенциала двух стабильно функционирующих ячеек памяти с заведомо различными уровнями заряда на плавающем затворе (рис. 3).

На основе экспериментально полученных данных установлено, что разница в величине поверхностного потенциала ячеек с зарядом  $q \approx -1,4 \cdot 10^{-14}$  Кл и  $q \approx 0$  Кл составила 60 мВ. Расхождение эмпирических и расчётных результатов, обусловлено проведением измерений на воздухе. Значения величин поверхностного потенциала для ячеек с зарядом  $q \approx -1,4 \cdot 10^{-14}$  Кл и  $q \approx 0$  Кл составили 300 мВ и 360 мВ, соответственно.

Определив уровень поверхностного потенциала ячеек в стабильном рабочем состоянии, можно провести исследование поверхностного потенциала ячеек, подверженных эффекту избыточного накопления основных/неосновных носителей заряда.

Экспериментально получены уровни поверхностного потенциала ( $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ ) для двух некорректно функционирующих ячеек памяти. Их величина составила  $\varphi_1 = 281$  мВ,  $\varphi_2 = 322$  мВ. Уровень поверхностного потенциала для работоспособной ячейки в записанном состоянии равен 300 мВ, таким образом, можно сделать вывод, что вследствие каких либо причин заряд на ПЗ изменился. Это свидетельствует

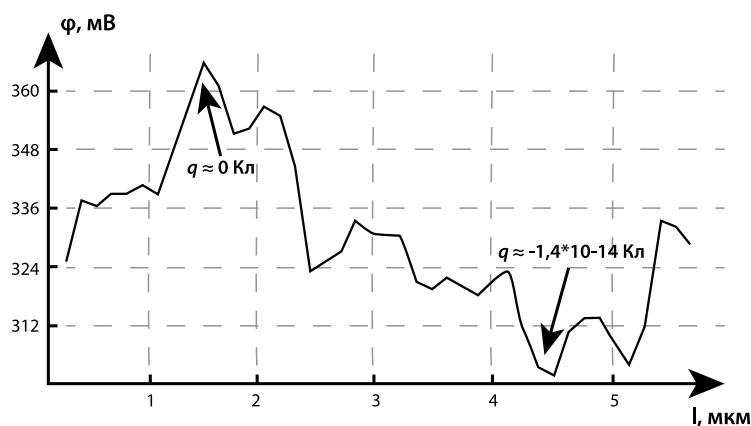


Рис. 3

### Профиль распределения поверхностного потенциала в исследуемой области

о подверженности ячеек эффекту избыточного накопления основных/неосновных носителей заряда.

#### Заключение

Исследование поверхностного потенциала в непосредственной близости от ПЗ методом зонда Кельвина позволяет диагностировать явления неконтролируемого изменения уровня заряда на плавающем затворе ячеек памяти, которые могут способствовать изменению электрофизических параметров элемента хранения и потере его работоспособности.

#### Литература

1. Brewer J. E., Gill M. Nonvolatile memory technologies with emphasis on flash // Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2008, pp. 445-591.

2. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. – М.: Техносфера, 2004. – С. 87-91.
3. De Nardi C., Desplats R., Perdu P., Beaudoin F., Gauffier J. L. EEPROM Failure Analysis Methodology: Can Programmed Charges Be Measured Directly by Electrical Techniques of Scanning Probe Microscopy? // Proceedings of the 31st ISTFA, November 2005.

#### References

1. Brewer J. E., Gill M. Nonvolatile memory technologies with emphasis on flash // Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2008, pp. 445-591.
2. Mironov V. L. *Osnovy skaniryushey zondovoy mikroskopii* [Basics of scanning microscopy]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2004, pp. 87-91.
3. De Nardi C., Desplats R., Perdu P., Beaudoin F., Gauffier J. L. EEPROM Failure Analysis Methodology: Can Programmed Charges Be Measured Directly by Electrical Techniques of Scanning Probe Microscopy? // Proceedings of the 31st ISTFA, November 2005.