

УДК 621.382

**РАЗЛИЧНЫЕ ТИПЫ СТРУКТУР АНТИПРОЖИГАЕМЫХ ПЕРЕМЫЧЕК
ДЛЯ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕМ ВЕНТИЛЬНЫХ МАТРИЦ
И ПОСТОЯННЫХ ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВ**

В.А. ПЕТРОВИЧ, В.П. БОНДАРЕНКО, А.Л. ДОЛГИЙ, С.В. РЕДЬКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь**Поступила в редакцию 19 февраля 2018*

Аннотация. Использование антипрожигаемых перемычек в качестве программируемых элементов становится все более популярным в программируемых пользователем вентиляльных матрицах и программируемых постоянных запоминающих устройствах. В работе обсуждаются характеристики различных структур антипрожигаемых перемычек, а также компромисс между производительностью и надежностью.

Ключевые слова: антипрожигаемая перемычка, программируемая пользователем вентиляльная матрица, программируемое постоянное запоминающее устройство.

Abstract. The use of anti-fuses as programmable elements is becoming popular in field programmable gate arrays and programmable read-only memories. The characteristics of various structures of anti-fuses and compromise between performance and reliability will be discussed in this paper.

Keywords: anti-fuse, field programmable gate array, programmable read-only memory.

Doklady BGUIR. 2018, Vol. 115, No. 5, pp. 38-43**Variou anti-fuse structures for field programmable gate arrays
and programmable read-only memories****V.A. Petrovich, V.P. Bondarenko, A.L. Dolgiy, S.V. Redko****Введение**

В области заказных и специализированных интегральных схем программируемых пользователем вентиляльных матрицах (ППВМ) занимают стабильную долю рынка, а антипрожигаемые перемычки являются основным программируемым элементом для данных продуктов. В общем случае они имеют два проводящих электрода и непроводящий слой или сэндвич из нескольких таких слоев между ними. Структуры типа диффузионный n^+ (n^+ -Si)/ONO/поликремний (ПКК) успешно используются как антипрожигаемые перемычки в ППВМ в течение многих лет [1, 2]. Относительно недавно в том же качестве начали применять антипрожигаемые перемычки на основе TiW/аморфный кремний (a -Si)/TiW [3]. В настоящей работе сравниваются основные характеристики антипрожигаемых перемычек на основе следующих типов структур: n^+ -Si/ONO/ПКК, ПКК/NO/ПКК, металл (Me)/NON/Me, Me/ a -Si/Me, Me/N/Me, где O обозначает оксид кремния, а N – нитрид кремния. Предметом сравнения являются: ток утечки и его зависимость от температуры, исходное сопротивление антипрожигаемой перемычки, напряжение пробоя и зависимость срока службы (времени до пробоя) от приложенного напряжения, а также сопротивление при чтении запрограммированной антипрожигаемой перемычки.

Утечки и напряжение пробоя

На рис. 1 представлено сравнение тока утечки и напряжения пробоя нескольких различных вариантов антипрожигаемых перемычек. Представленные графики показывают, что в целом антипрожигаемые перемычки типа Me/изолятор(I)/Me имеют более высокий ток утечки I_{UT} , чем n^+ -Si/ONO/ПКК. Причина в том, что качество и ток утечки диэлектриков, выращенных при высокой температуре, лучше, чем у тех, которые нанесены при низкой температуре, что является основным ограничением технологии металлических антипрожигаемых перемычек.

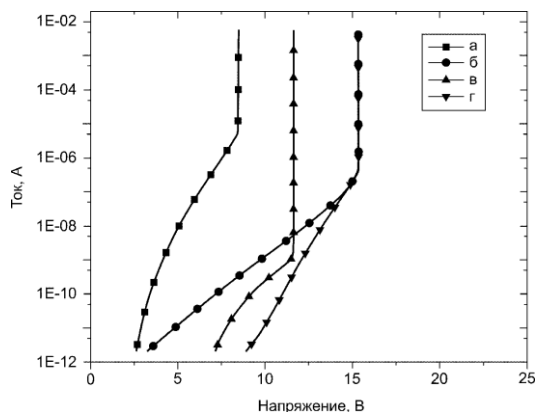


Рис. 1. Вольтамперные характеристики незапрограммированных антипрожигаемых перемычек: a – Me/N/Me; b – Me/a-Si/Me; v – Me/NON/Me; z – n^+ -Si/ONO/ПКК

Ток утечки можно легко уменьшить путем увеличения толщины пленки (сэндвича) антипрожигаемой перемычки. Но с ростом толщины антипрожигаемой перемычки увеличивается напряжение пробоя (программирования) $U_{ПР}$, что ограничивает возможности масштабирования данных элементов. Поэтому для дальнейшего снижения тока утечки приходится полагаться на подбор электродов, материалов сэндвича антипрожигаемой перемычки, оптимальной структуры ячейки и условий процесса формирования. Из рис. 1 также следует, что структуры антипрожигаемой перемычки типа Me/I/Me могут иметь более низкий ток утечки и более низкое напряжение пробоя, чем антипрожигаемые перемычки на основе a -Si [4]. Меньшее значение пробивного напряжения прежде всего востребовано при интеграции антипрожигаемых перемычек с передовыми технологическими процессами высокоскоростных комплементарных структур металл-оксид-полупроводник.

Влияние температуры на ток утечки антипрожигаемых перемычек показано на рис. 2. Структура антипрожигаемой перемычки n^+ -Si/ONO/ПКК, как и прежде, имеет самую низкую плотность тока утечки и самую слабую температурную зависимость этого тока среди всех исследованных типов антипрожигаемых перемычек.

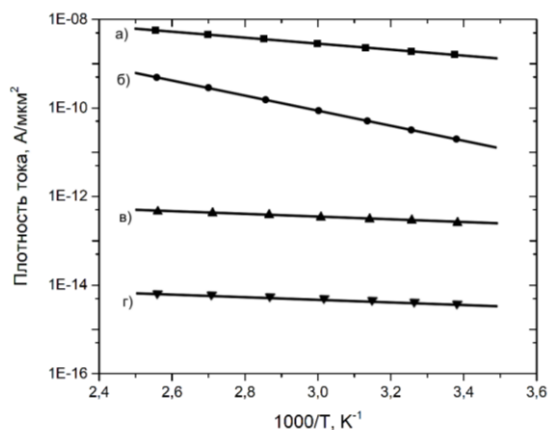


Рис. 2. Зависимость плотности тока утечки от температуры: a – Me/N/Me; b – Me/a-Si/Me; v – Me/NON/Me; z – n^+ -Si/ONO/ПКК

Сопротивление после программирования

На рис. 3 показан график вольтамперных характеристик (ВАХ) запрограммированных током 5 мА антипрожигаемых перемычек. Численные значения сопротивления в запрограммированном состоянии $R_{\text{ПР}}$ для различных типов антипрожигаемых перемычек (включая ПКК/NO/ПКК [5]) приведены в таблице.

Сравнение параметров антипрожигаемых перемычек

Тип	$R_{\text{ПР}}$, Ом ($I_{\text{ПР}} = 5 \text{ мА}$)	$U_{\text{ПР}}$, В	$J_{\text{УТ}}$, пА/мкм ²	$I_{\text{УТ}}^{125^\circ\text{C}} / I_{\text{УТ}}^{25^\circ\text{C}}$	$T_{\text{ДПР}}$, с (при 5,5 В)	$I_{\text{НАР}} / I_{\text{ПР}}$
n^+ /ONO/ПКК [7]	500	14	0,01	2	1E+19	> 10
ПКК/NO/ПКК [5]	500	11	0,1	н/д	1E+12	н/д
Me/NON/Me [4]	65	11	1	2	1E+10	2
Me/a-Si/Me [3]	180	13	100	50	∞	1
Me/N/Me	40	8	100	5	30000	2

Антипрожигаемые перемычки типа Me/I/Me демонстрируют заметно более низкие значения сопротивления в запрограммированном состоянии. Ранее было показано, что в антипрожигаемых перемычках со структурой n^+ -Si/ONO/ПКК при программировании образуются поликремниевые мостики [6]. По аналогии полагают, что при программировании антипрожигаемых перемычек типа Me/I/Me в них образуются металлические или силицидные мостики. Данные структуры имеют также более низкое значение остаточного сопротивления, что связано со свойствами электродов в системе Me/I/Me.

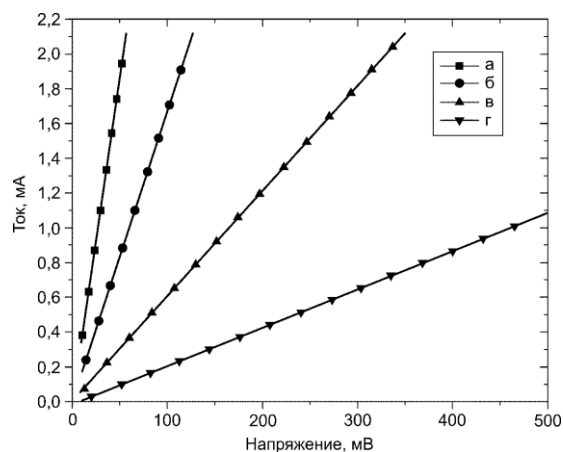


Рис. 3. ВАХ запрограммированных током 5 мА антипрожигаемых перемычек: а – Me/N/Me; б – Me/a-Si/Me; в – Me/NON/Me; г – n^+ -Si/ONO/ПКК

Для устройств ППВМ, основанных на структурах типа n^+ -Si/ONO/ПКК, антипрожигаемые перемычки в цепях, критичных ко времени, задержки можно запрограммировать большими токами $I_{\text{ПР}}$ для уменьшения их остаточного сопротивления. Более низкие значения сопротивления в антипрожигаемых перемычках типа Me/I/Me, достигаемые при небольших значениях программирующего тока, выглядят привлекательно, но стоит иметь в виду, что для обеспечения отказоустойчивого чтения ток программирования придется существенно увеличить. Этот эффект будет рассмотрен позднее.

Зависимость срока службы (времени до пробоя) от приложенного напряжения

В устройствах ППВМ незапрограммированные антипрожигаемые перемычки должны выдерживать напряжение питания длительное время без деградации. На рис. 4 показаны зависимости времени до пробоя $T_{\text{ДПР}}$ от приложенного напряжения для нескольких вариантов антипрожигаемых перемычек. За исключением одного типа антипрожигаемой перемычки (Me/N/Me), у которого очень низкое напряжение пробоя, все другие структуры имеют время до пробоя, превышающее 10 лет, при напряжении 5,5 В. Срок службы антипрожигаемой перемычки (Me/N/Me) можно увеличить путем увеличения толщины нитрида. Тем не менее определить конкретное время жизни до пробоя затруднительно. Известно, что срок службы запрограммированных антипрожигаемых перемычек типа n^+ -Si/ONO/ПКК превышает 10 лет [7]. Для выяснения ожидаемого срока службы антипрожигаемых перемычек типа Me/I/Me требуется провести больше исследований. В отличие от структур с диэлектриками в антипрожигаемых

перемычках на основе аморфного кремния эффект пробоя со временем нахождения в электрическом поле не проявляется. Это положительное качество позволяет антипрожигаемой перемычке находиться под напряжением 5,5 В неограниченное количество времени без пробоев. Однако есть и отрицательные моменты: ток утечки у a -Si со временем увеличивается [3]. Это явление необходимо учитывать при разработке конечного устройства.

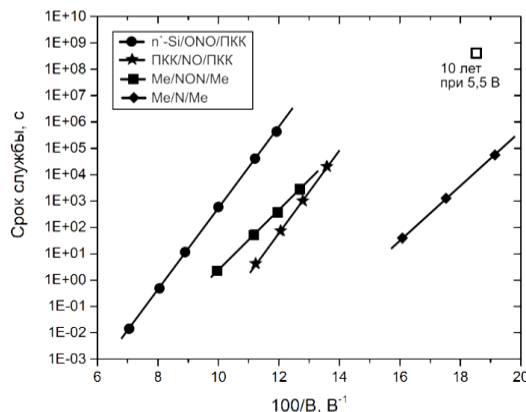


Рис. 4. Зависимость срока службы от приложенного напряжения

Стабильность сопротивления после программирования

Для обеспечения надежной работы схемы требуется, чтобы сопротивление запрограммированной антипрожигаемой перемычки оставалось неизменным в течение длительного времени. Было выявлено, что в запрограммированных антипрожигаемых перемычках типа Me/I/Me может происходить нарушение запрограммированного состояния, как показано на рис. 5. Антипрожигаемая перемычка может «выключиться», если значение постоянного тока при чтении станет сопоставимо или превысит величину тока программирования. Данное поведение проявляется как при прямом, так и при обратном направлении считывания (по отношению к направлению тока программирования), причем при обратном направлении вероятность нарушения запрограммированного состояния выше. Это явление, по сути, является электромиграцией.

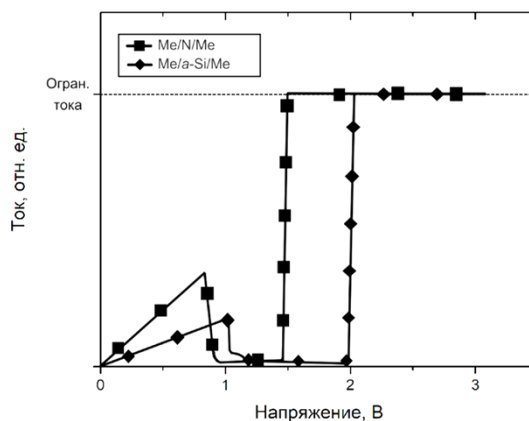


Рис. 5. Нарушение состояния запрограммированной антипрожигаемой перемычки в процессе чтения. С дальнейшим увеличением приложенного напряжения антипрожигаемая перемычка будет снова запрограммирована

В антипрожигаемых перемычках на основе структуры n^+ -Si/ONO/ПКК подобного нарушения запрограммированного состояния при считывании не наблюдается (см. рис. 6), поскольку закорачивающий мостик сформирован из моно- или поликристаллического кремния, а не из металла.

Вышеприведенные результаты были получены в экспериментах с линейной разверткой напряжения. Однако в реальных изделиях с ППВМ антипрожигаемые перемычки обычно подвергаются воздействию переменного тока с отсутствием компоненты постоянного. Известно, что под воздействием переменного тока эффекты электромиграции выражены менее ярко, что обычно приводит к более продолжительному сроку службы, чем при воздействии постоянного тока [8]. Предварительные результаты экспериментов подтверждают эту гипотезу. Чтобы избежать

данной проблемы рабочий ток для антипрожигаемых перемычек типа Me/I/Me должен выбираться таким образом, чтобы он был значительно ниже значения тока программирования [3]. Для антипрожигаемых перемычек на основе структуры n^+ -Si/ONO/ПКК такого ограничения по рабочему току не требуется, поскольку у них эффект нарушения запрограммированного состояния считыванием не наблюдается.

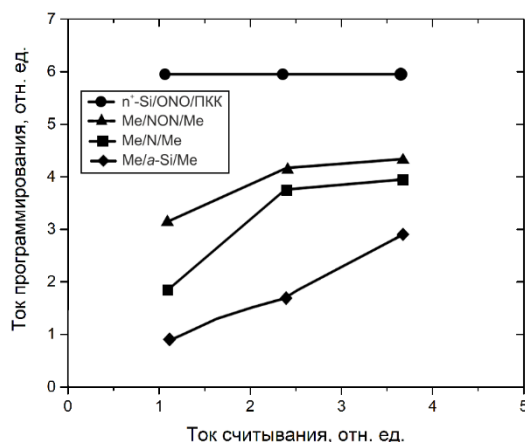


Рис. 6. Отношение тока нарушения запрограммированного состояния к току программирования в зависимости от типа структуры антипрожигаемой перемычки. Закорачивающие мостики из поликремния менее чувствительны к нарушению запрограммированного состояния

Влияние толщины изолятора на рабочие характеристики

Увеличение толщины изолятора антипрожигаемых перемычек типа Me/I/Me уменьшает емкость и ток утечки, но увеличивает напряжение программирования и срок службы (время нахождения в незапрограммированном состоянии при рабочем напряжении). Уменьшение толщины изолятора ведет к уменьшению сопротивления перемычки в запрограммированном состоянии и понижает вероятность нарушения запрограммированного состояния при считывании. Необходимо выбрать подходящий баланс всех параметров в зависимости от решаемой задачи.

Заключение

Антипрожигаемые перемычки на основе структуры n^+ -Si/ONO/ПКК хорошо изучены и используются в течение многих лет. Благодаря малой величине сопротивления в запрограммированном состоянии и малой емкости, антипрожигаемые перемычки типа Me/I/Me, независимо от того a -Si или диэлектрик лежит в их основе, являются перспективным типом структуры для современных ППВМ и программируемых постоянных запоминающих устройств нового поколения. Однако для обоснования их надежности и технологичности требуется проведение дополнительных исследований.

Список литературы / References

1. Dielectric based antifuse for logic and memory Ics/ E. Hamdy [et al.] // Electron Devices Meeting. IEDM'88. Technical Digest., International. 1988. P. 786–789.
2. Characterization and Modeling of a Highly Reliable ONO Antifuse for High-Performance FPGA and PROM / G. Liu [et al.] // Int. J. of Materials Science and Applications. Vol. 5, № 3. 2016. С. 169–177.
3. Wong R., Gordon K. Evaluating the Reliability of the Quicklogic Antifuse // Electronic Engineering. June, 1992. P. 49–55.
4. Antifuse structure comparison for field programmable gate arrays / S. Chiang [et al.] // Int. Electron Devices Meeting. Technical Digest. 1992. P. 611–614.
5. Scaled dielectric antifuse structure for field-programmable gate array applications / D.K.Y. Liu [et al.] // IEEE Electron Device Letters. 1991. Vol. 12, №. 4. P. 151–153.
6. Conductive channel in ONO formed by controlled dielectric breakdown / S. Chiang [et al.] // VLSI Technology. 1992. P. 20–21.
7. Oxide-nitride-oxide antifuse reliability / S. Chiang [et al.] // Reliability Physics Symposium. 1990. P. 186–192.
8. Comparison of electromigration reliability of tungsten and aluminum vias under DC and time-varying current stressing / J. Tao [et al.] // Proc. of 30th International Reliability Physics Symposium. 1992. P. 338–343.

Сведения об авторах

Петрович В.А., к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Бондаренко В.П., к.т.н., доцент, заведующий НИЛ 4.3 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Долгий А.Л., с.н.с. НИЛ 4.3 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Редько С.В., научный сотрудник НИЛ 4.3 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел.+375-17-293-88-54;
e-mail: sv.redko@bsuir.by
Редько Сергей Владимирович

Information about the authors

Petrovich V.A., PhD, associate professor, associate professor of micro- and nanoelectronics department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Bondarenko V.P., PhD, associate professor, head of SRL 4.3 of R&D department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Dolgiy A.L., senior researcher of SRL 4.3 of R&D department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Redko S.V., researcher of SRL 4.3 of R&D department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
tel. +375-17-293-88-54;
e-mail: sv.redko@bsuir.by
Redko Sergey Vladimirovich