

О.А. ПЕТРОСЯН, Л.М. ТРАВАДЖЯН, В.В. БУНИАТЯН

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
МНОГОИСТОКОВОЙ ФЕРРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ ПАМЯТИ**

Исследованы характеристики остаточной поляризации и логических уровней напряжения считывания многоисточковой ферроэлектрической ячейки памяти (ЯП) при изменении температуры в широком диапазоне. Проведено моделирование ЯПс использованием программного пакета HSPICE. Показано, что в предложенной нами многоисточковой ЯП имеется достаточный резерв для уменьшения площади ферроэлектрического конденсатора.

Ключевые слова: масштабирование, ячейка памяти, поляризация, температура, моделирование, коэрцитивное напряжение, битовая линия.

Введение. Ферроэлектрическая (ФЭ) память (FeRAM) является энергонезависимой памятью следующего поколения благодаря высокому быстродействию, низкой потребляемой мощности, стабильности основных параметров к внешним воздействиям и хорошей совместимости с планарной технологией изготовления сверхбольших интегральных схем. Из-за проблем, возникающих при масштабировании, для работы ЯП будущих поколений FeRAM потребуются более низкие рабочие напряжения (обеспечивается благодаря высокой диэлектрической проницаемости ФЭ материалов) с более высокими значениями поляризации.

В целом FeRAM является весьма надежной технологией изготовления энергонезависимой памяти, работоспособной даже при высоких рабочих температурах. По литературным данным, ФЭ память сохраняет данные в течение более десяти лет при температуре 85°C [1].

В последние годы ФЭ память используется в различных автомобильных проектах и сертифицирована для работы в самых неблагоприятных условиях. Так, вся продукция фирмы Ramtron, основного производителя ФЭ памяти, классифицирована для работы в температурном диапазоне от -40 до $+85^{\circ}\text{C}$.

Начиная с 2006-2007 годов начата новая программа сертификации FeRAM для автомобильной электроники согласно требованиям стандартов AEC-Q100 Grade 3 ($+85^{\circ}\text{C}$) и Grade 1 ($+125^{\circ}\text{C}$). Однако для успешного применения FeRAM на автомобильном рынке требуется хранение данных при 125°C свыше десяти лет. При этом необходимо, чтобы следующие поколения FeRAM удовлетворяли данным требованиям и с более высокой надежностью обеспечивали высокие значения спонтанной поляризации. В этой связи используемый в структуре

конденсатора ФЭ материал должен иметь высокую остаточную поляризацию, низкое коэрцитивное поле и необходимую температуру Кюри [2].

Несмотря на то, что характеристики ФЭ материалов хорошо управляются и одновременно обладают высокими значениями диэлектрических постоянных, однако возникает важная проблема: в диапазоне рабочих температур обеспечить низкую температурную зависимость основных характеристик [2,3]. Отметим, что для традиционных ФЭ пленок с поликристаллической структурой петля гистерезиса (остаточная поляризация) существенно ухудшается в диапазоне 100...200⁰С. Топологическими методами, в частности за счет некоторого увеличения площади ФЭ конденсатора, можно обеспечить запас проектирования ЯП для компенсации уменьшения поляризации.

Следовательно, для обеспечения надежной работы FeRAM исследование температурных характеристик является весьма актуальной задачей, так как параметры и характеристики ФЭ материалов очень чувствительны к изменениям температуры [2-4].

Целью работы является изучение характеристик остаточной поляризации и логических уровней напряжения считывания разработанной многоистоковой ФЭ 1Т-пСЯП[5] в широком диапазоне изменения температуры.

Экспериментальная часть. Температурные характеристики ЯП изучены с использованием программы моделирования HSPICE в диапазоне типичных рабочих температур (-40...125)⁰С. Исследования температурных характеристик петли гистерезиса [6] ФЭ конденсатора показали, что вид петли, а также ее основные параметры (остаточная поляризация и коэрцитивное поле) являются температурно-зависимыми величинами.

В работе характеристики поляризации и напряжения на битовой линии рассчитаны с помощью моделированных временных характеристик ЯП в режимах записи и считывания. Для данного примера моделирования напряжение питания составляло 3В, частота сигнала - 5 МГц, площадь ФЭ конденсатора - $4,5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$, материал ферроэлектрика - PZT.

На рис. 1-3 представлены температурные характеристики напряжений V_L , V_0 и $\Delta V_{BL} = (V_L - V_0)$ на битовой линии ЯП, соответствующих логическим уровням.

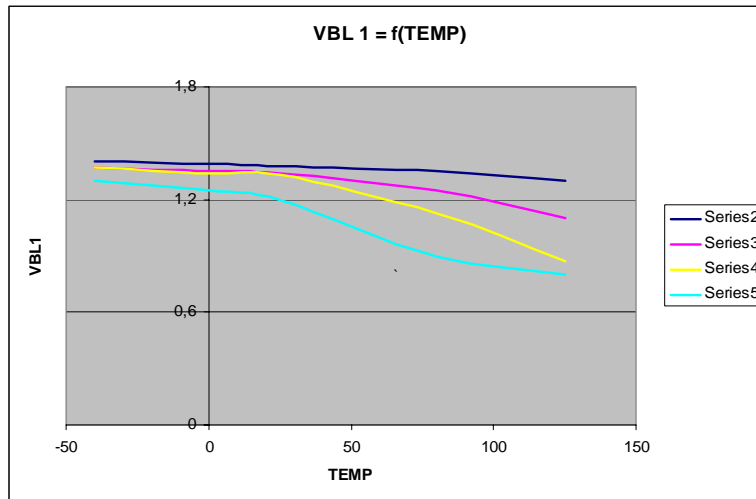


Рис. 1. Зависимость соответствующего логической "1" напряжения $V_1(V_{BL1})$ от температуры при различных числах конденсаторов (источков) в ЯП

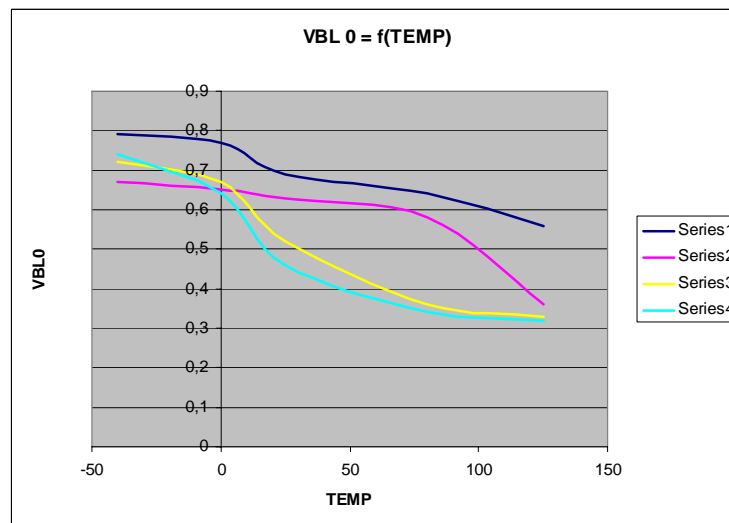


Рис. 2. Зависимость соответствующего логическому "0" напряжения $V_0(V_{BL0})$ от температуры при различных числах конденсаторов (источков) в ЯП

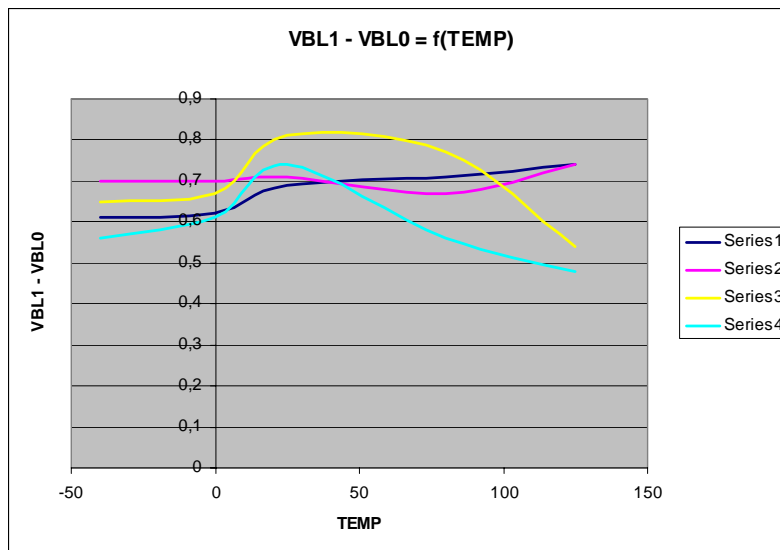


Рис.3. Зависимость разности напряжений $\Delta V_{BL} = (V_1 - V_0)$ от температуры при различных числах конденсаторов

Расчетные значения напряжений V_1 и V_0 при заданных значениях емкостей C_{BL} и C_S битовой линии и ФЭ конденсатора определяются в виде

$$V_1 = \frac{Q_1}{C_{BL} + C_S} \text{ и } V_0 = \frac{Q_0}{C_{BL} + C_S},$$

где Q_1 и Q_0 - значения остаточных зарядов, соответствующих логическим состояниям "1" и "0".

Наблюдаемый на рис. 1-3 спад уровней напряжений в первую очередь обусловлен температурной зависимостью остаточного заряда в ФЭ конденсаторе. Влияние температуры на количественные характеристики поляризации (остаточного заряда) ФЭ ячейки памяти показано на рис. 4 и 5.

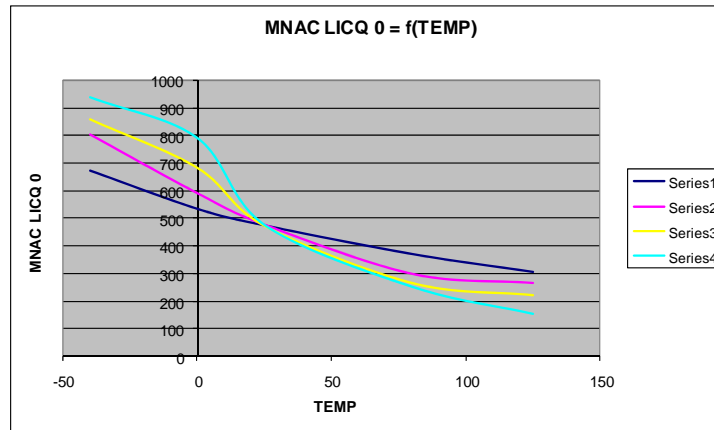


Рис. 4. Зависимость соответствующего логическому "0" остаточного заряда Q_0 от температуры при различных числах конденсаторов в ЯП

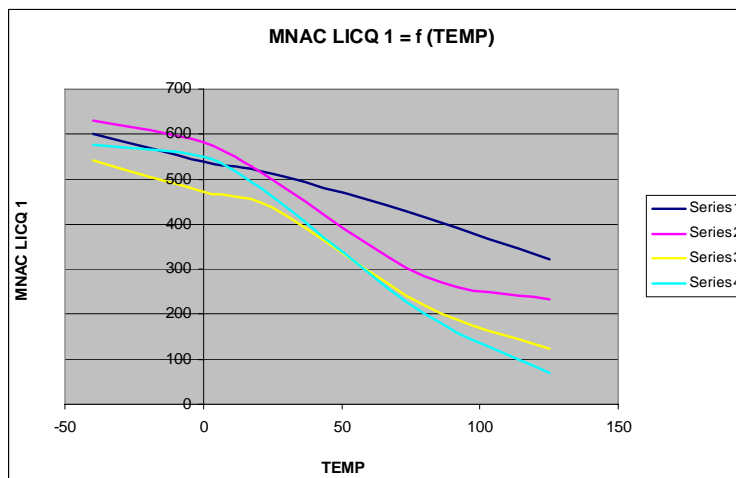


Рис. 5. Зависимость соответствующего логической "1" остаточного заряда Q_1 от температуры при различных числах конденсаторов в ЯП

Очевидно, что величина остаточного заряда Q (или переключаемая поляризация $Q=2Pr$) зависит от температуры. Остаточный заряд спадает с повышением температуры и практически исчезает при температуре Кюри. Моделированные характеристики дают возможность получить некоторые важные показатели. Так, темп уменьшения остаточного заряда Q_0 зависит от числа конденсаторов, подключенных к ЯП. При одном конденсаторе величина остаточного заряда при температуре 100°C спадает до 74 % заряда при комнатной температуре, при двух конденсаторах - 62 %, при четырех - уже 43 %. В принятом для ФЭ памяти

рабочем температурном диапазоне от комнатной до 100°C температурный коэффициент уменьшения остаточного заряда в линейной области изменяется в пределах $1,5 \dots 3,5 \text{ фКл}^{\circ}\text{C}$ при подключении к ЯП от одного до четырех конденсаторов соответственно. Эти данные довольно близки известным из литературы экспериментальным результатам для ЯП со структурой 1Т1С. Важным температурно-зависимым параметром петли гистерезиса является также коэрцитивное напряжение V_c . На рис. 6 показана рассчитанная из петли гистерезиса кривая температурной зависимости коэрцитивного напряжения. Коэрцитивное напряжение тонких ФЭ пленок растет с понижением температуры. Напряжение насыщения петли гистерезиса равно $\sim 2V_c$. Следовательно, при более низких температурах петля будет частично переключенной, и при записи информации она будет не полностью поляризованной.

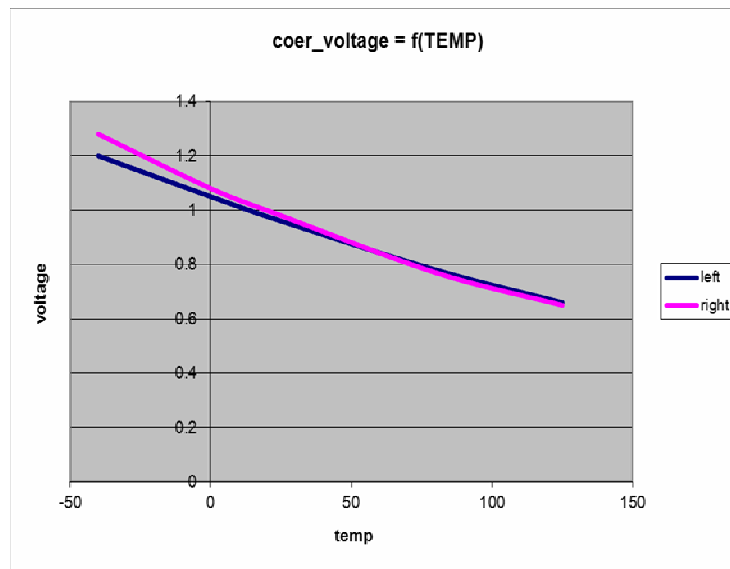


Рис. 6. Зависимость двух значений коэрцитивного напряжения ($+V_c$ и $-V_c$) от температуры

Моделированные температурные зависимости заряда спонтанной поляризации и коэрцитивного напряжения довольно хорошо описываются в рамках известной термодинамической теории Ландау [7, 8] для ФЭ фазы. Согласно этой теории, температурные характеристики ФЭ материала, в первую очередь, определяются температурным поведением χ диэлектрической восприимчивости, описываемой законом Кюри-Вейса:

$$\chi = \begin{cases} \frac{\varepsilon_0 C}{T - T_c}, & \text{если } T > T_c, \\ \frac{\varepsilon_0 C}{2(T_c - T)}, & \text{если } T < T_c, \end{cases}$$

где $\varepsilon_0 = 8,8542 \text{ нФ/м}$ - диэлектрическая проницаемость вакуума; C - постоянная Кюри; T_c - температура фазового перехода Кюри.

В ферроэлектрической фазе ($T < T_c$) с повышением температуры χ растет, что эквивалентно уменьшению заряда спонтанной поляризации.

На рис. 7 показаны графики экспериментальной температурной зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь ФЭВСТ пленок [8]. Так как величина спонтанной поляризации, в первую очередь, определяется диэлектрической проницаемостью, следовательно, моделированные температурные характеристики качественно и количественно находятся в хорошем соответствии как с теоретическими, так и экспериментальными (рис.7) данными.

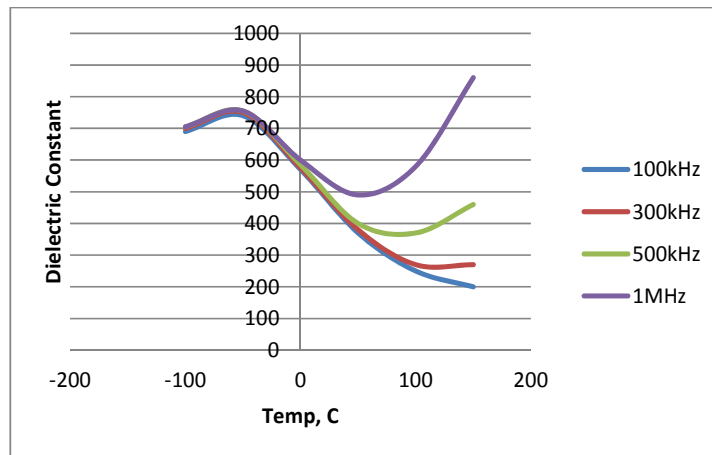


Рис. 7. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости ФЭВСТ пленок в диапазоне частот от 100 кГц до 1 МГц

Однако анализ литературных данных показывает, что экспериментальные температурные зависимости ФЭ материалов (элементов памяти) в некоторых случаях противоречивы. Так, некоторые экспериментальные данные заряда остаточной поляризации в ФЭ пленках [7, 8] противоречат термодинамической теории, согласно которой остаточная поляризация с понижением температуры должна увеличиваться. В основном, это обусловлено тем обстоятельством, что диэлектрические свойства ФЭ пленок строго зависят также от технологических условий их формирования. В случаях, когда величина приложенного электри-

ческого поля для насыщения поляризации не столь высокая, с понижением температуры остаточная поляризация уменьшается, что обусловлено более высокими значениями коэрцитивного напряжения при низких температурах. Увеличение коэрцитивного напряжения затрудняет изменение направления поляризации, и при низких температурах остаточная поляризация уменьшается.

Выводы

1. Моделированные температурные характеристики разработанной многоисточковой ферроэлектрической ЯП хорошо описываются в рамках известной термодинамической теории Ландау, согласно которой остаточная поляризация с понижением температуры увеличивается.

2. С повышением температуры явление поляризации в ферроэлектрике постепенно затухает, что приводит к снижению величины остаточного заряда поляризации, а следовательно, и логических уровней напряжения сигналов считывания.

3. Несмотря на уменьшение остаточного заряда, в отмеченных условиях моделирования величина остаточной поляризации остается выше уровня для стабильной работы ЯП со структурой 1Т-1С (~135 фКл/мкм²). Следовательно, в принятом для ферроэлектрической памяти рабочем температурном диапазоне предложенной нами многоисточковой ферроэлектрической 1Т-пСЯ имеется достаточный резерв для уменьшения площади ФЭ конденсатора.

4. Полученные количественные характеристики могут быть использованы на этапе проектирования для обоснованного выбора температурного диапазона стабильной работы многоисточковой ферроэлектрической 1Т-пС ЯП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зайцев И. П.** Что же с памятью FRAM стало?// КОМПОНЕНТЫ И ТЕХНОЛОГИИ.- 2007.- № 8.- С. 102-106.
2. **Yuan G. L., Liu J. M., Zhang S. T.** Low-temperature switching fatigue behavior of ferroelectric SrBi₂Ta₂O₉ thin Films // APPLIED PHYSICS LETTERS.- 2004.-Vol.84, № 69. - 3 p.
3. **Yuan, G. L., Liu, J.-M., Wang, Y. P.** Temperature-dependent fatigue behaviors of ferroelectric ABO₃-type and layered perovskite oxide thin films// Applied Physics Letters.- 2004.-Vol. 84. - P.3352 - 3354.
4. **Matichyn Serhiy.** Fabrication and Characterisation of Ferroelectric Lead Zirconate Titanate and Strontium Bismuth Tantalate Thin Films // Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades. -Universität Magdeburg.- Juli, 2006. - P. 126.
5. Патент РА АМ20100167. Ферроэлектрическая ячейка/ **В.В. Буннятиян, О.А. Петросян, Л.М. Траваджян.** - Заявл. 07.12.10; Опубл. 25.03.11.

6. **Տրավաչյան Լ.Ս.** Ֆերոէլեկտրական կոնդենսատորի հիստերեզիսի օղակի մոդելավորում// Չայաստանի պետական ճարտարագիտական համալսարանի (Պոլիտեխնիկ) Լրաբեր. Գիտական և մեթոդական հոդվածների ժողովածու.- Երևան, 2011.- Հատոր3,№1.- էջ 296-300:
7. **Guido GERRA.** Surface-Stimulated Phenomena in the Polarization Response of Ferroelectrics. – Suisse, 2008. - 98 p.
8. **Yip Cheung Ping.** Processing and Characterization of Manganese-doped Barium Stannate Titanate Ferroelectric Ceramics/ CITY UNIVERSITY OF HONG KONG DEPARTMENT OF PHYSICS AND MATERIALS SCIENCE.- March, 2005.- P. 35.

ГИУА (ПОЛИТЕХНИК). Материал поступил в редакцию 10.03.2012.

Օ.Հ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Լ.Մ. ՏՐԱՎԱՋՅԱՆ, Վ.Վ. ԲՈՒՆԻԱՏՅԱՆ
ԲԱԶՄԱԱԿՈՒՆՔԱՅԻՆ ՖԵՐՈԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՀԻՇՈՂ ՏԱՐԻԻ
ՋԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ուսումնասիրվել են հիշող տարրի մնացորդային բևեռացման և ընթերցման լարումների բնութագրերը ջերմաստիճանի փոփոխման լայն միջակայքում: Կատարվել է հիշող տարրի ջերմաստիճանային բնութագրերի մոդելավորում HSPICE ծրագրային փաթեթ իմիջոցով: Ցույց է տրված, որ առաջարկված հիշող տարրում դեռևս գոյություն ունի կոնդենսատորի մակերեսի փոքրացման պաշար:

Առանցքային բառեր. մասշտաբավորում, հիշող տարր, բևեռացում, ջերմաստիճան, մոդելավորում, կոերցիտային լարում, բիթային գիծ:

O.H. PETROSYAN, L.M. TRAVAJYAN, V.V. BUNIATYAN
INVESTIGATION ON TEMPERATURE CHARACTERISTICS OF
FERROELECTRIC MULTISOURCE MEMORY CELL

The characteristics of the remanent polarization and the logic levels of sensing voltages for multi source ferroelectric memory cell are investigated in a wide range of temperature. The simulation of the memory cell using the software HSPICE is performed. It is shown that our proposed memory cell has a sufficient reserve to reduce the area of ferroelectric capacitor.

Keywords: zoom, memory cell, polarization, temperature, simulation, coercive voltage, bit line.