

Тонкоплёночная структура для элемента программирования, интегрированного в многоуровневую металлизацию КМОП БИС

С.И. Бабкин, А.С. Новоселов

Исследованы электрофизические параметры тонкоплёночной структуры на основе плёнок аморфного кремния и двуокиси кремния с толщиной 120-400 Å и 30-35 Å соответственно. Плёнки формируются с использованием оборудования и процессов, которые интегрируются в технологический цикл создания многоуровневой металлизации КМОП БИС. Показано, что на основе исследованной структуры могут быть сформированы однократно программируемые элементы переключения.

Ключевые слова: однократно программируемый элемент, коммутирующая перемычка, аморфный кремний.

The thin film structure for programming element, integrated into the multilevel metallization CMOS VLSI

S.I. Babkin, A.S. Novoselov

The electrophysical parameters of thin film structures based on amorphous silicon and silicon dioxide with the thickness of 120-400 Å and 30-35 Å, respectively are investigated. The films were formed using the equipment and processes that are integrated into the technological cycle of the multilevel metallization VLSI CMOS. It is shown that one-time programmable switching elements can be formed on the basis of the investigated structures.

Keywords: one-time programmable element, antifuse, amorphous silicon.

Введение

Программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), включающие в себя различные функциональные блоки, изготовленные по КМОП технологии, уже давно находят применение при проектировании сложных электронных систем [1]. Необходимым условием для изготовления ПЛИС является наличие программируемого коммутирующего устройства, соединяющего составные части ПЛИС. Таким устройством может быть однократно программируемый элемент. Однократно программируемые элементы различают в зависимости от значения сопротивления во включённом $R_{\text{вкл}}$ и в выключенном состоянии $R_{\text{выкл}}$. Малое значение $R_{\text{вкл}}$ и большое $R_{\text{выкл}}$ характерно для элемента типа «пережигаемой» перемычки (англ. fuse). Обычно число задействованных перемычек составляет значительно меньше 50 %, поэтому широкое применение нашли элементы, которые имеют большое значение $R_{\text{выкл}}$ и,

соответственно, малое значения $R_{\text{вкл}}$ [2]. Существуют также «коммутирующие» перемычки или «анти-пережигаемые» перемычки (от англ. antifuse). В свою очередь «коммутирующие» перемычки делятся на два типа. Первый формируется на этапе транзисторного цикла и основан на эффекте пробоя тонкого окисла МОП структуры. Второй формируется на этапе многоуровневой металлизации и основан на эффекте пробоя конденсатора «металл-изолятор-металл» (МИМ), с использованием в качестве ёмкостного диэлектрика тонких плёнок аморфного кремния, температура осаждения которых совместима с температурой процессов металлизации. Вариант интеграции МИМ перемычки в многоуровневую разводку КМОП БИС представлен на рис. 1. Шины MET (N)-го и (N+1)-го уровня металлизации обычно формируются на основе плёнок TiN-Ti-Al-Ti-TiN, а межуровневые соединения VIA на основе плёнок Ti-TiN-W.

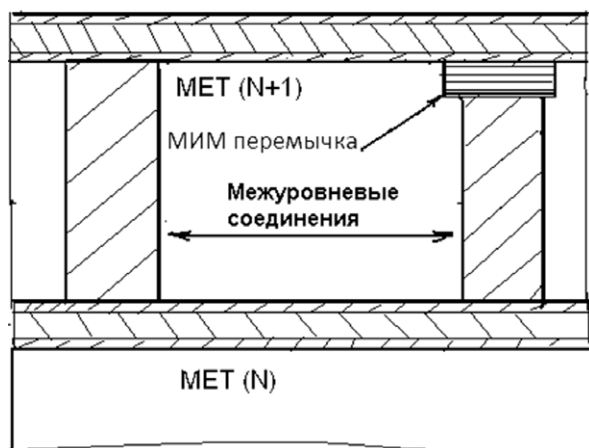


Рис. 1
Фрагмент металлизации КМОП БИС
с элементом переключателя МИМ

Переключатель типа МИМ имеет ряд преимуществ:

- малое значение $R_{\text{вкл}} < 100 \text{ Ом}$;
- низкое значение удельной ёмкости $< 2 \text{ фФ/мкм}^2$;
- стабильность параметров в экстремальных условиях (высокая температура, воздействие ионизирующего излучения).

Применение переключателей МИМ на основе плёнок аморфного кремния позволило компании Actel создать семейство высоконадёжных ПЛИС для военно-космических систем [3, 4].

К недостаткам данного типа переключателей относится сложность получения относительно небольших напряжений переключения (до 10 В) при больших значениях $R_{\text{выкл}} > 10^9 \text{ Ом}$. Для выполнения этих условий предлагается использовать многослойные структуры, состоящие из тонких плёнок аморфного кремния, оксида и оксинитрида кремния [5], осаждаемых различными методами, что требует применения специализированного оборудования. Очевидно также, что оптимизация такой структуры (количество и тип слоёв, толщины слоёв) в значительной степени зависит от методов их получения.

В данной работе исследуется возможность формирования переключателей с требуемыми параметрами на основе

трёхслойной структуры, включающей плёнки аморфного кремния и двуоксида кремния, изготовленных с использованием оборудования и процессов, применяемых в технологии многослойной металлизации КМОП БИС.

Методика проведения эксперимента

Плёнки аморфного гидрогенизированного кремния сложного состава $\alpha\text{-Si}_x\text{N}_y\text{H}_z$ (далее SiHN) осаждались в реакторе WxZ, размещённом на платформе установки Endura PVD 5500 фирмы Applied Materials [6]. Для осаждения плёнок SiO_2 использовался процесс химического осаждения из газовой смеси тетраэтоксисилана и озона [7] на установке DCVD Centura фирмы Applied Materials. Этот процесс традиционно используется для формирования межуровневой изоляции КМОП БИС.

Электрофизические параметры структуры исследовались с помощью тестового МИМ конденсатора, функцию обкладок которого выполняли межуровневое соединение на основе вольфрама $\text{Ø} 0,6 \text{ мкм}$ и шина металлизации, а изолятора – тонкоплёночная структура SiHN-SiO₂-SiHN [6]. ВАХ конденсаторов исследовались на измерительном комплексе Agilent Technologies B1500. Измерения каждого вида параметров проводились в 17 точках на кремниевой пластине $\text{Ø} 150 \text{ мм}$. Фиксировались максимальное и минимальное значения параметров.

Основные результаты

На рис. 2 представлена типовая ВАХ конденсатора на основе структуры W-SiHN-SiO₂-SiHN-TiN-AL. В предпробойной области увеличение напряжения, приложенного к обкладкам конденсатора, мало влияет на ток через него, который характеризуется значениями $\sim 10^{-9} \text{ А}$. При достижении напряжения пробоя, ток растёт лавинообразно, так что его значение, фиксируемое по достигаемому току в пределах 1-10 мА, практически не различимо. Этот фактор следует учитывать, так как от величины протекающего тока зависит сопротивление переключателя во включённом состоянии – $R_{\text{вкл}}$ (рис. 2).

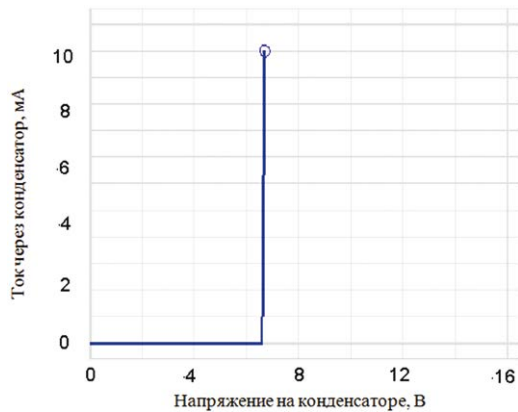


Рис. 2
ВАХ конденсатора на основе структуры W-SiHN-SiO₂-SiHN-TiN

На рис. 3 представлена зависимость напряжения пробоя ($U_{пр}$) конденсатора, измеренная по уровню тока 1 мА, от суммарной толщины SiHN в структуре SiHN-SiO₂-SiHN, где 1 – соответствует максимальному значению ($U_{пр max}$), а 2 – минимальному значению ($U_{пр min}$) напряжения пробоя. В целом зависимость имеет линейный характер. Наблюдаемая точка перегиба связана с изменением толщины SiO₂ в структуре, что соответствует возможным колебаниям кратковременного процесса осаждения SiO₂ в начальной стадии. Получаемая толщина SiO₂ 30-35 Å, является минимально возможной в реализуемых условиях, не требующих существенной перенастройки оборудования. Разброс $\Delta U_{пр} = U_{пр max} - U_{пр min}$ не превышает 1,0 В по пластине, что в целом соответствует требованиям к элементам antifuse.

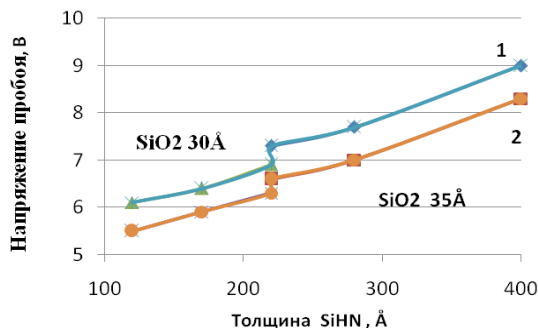


Рис. 3
Зависимость максимального (кривая 1) и минимального (кривая 2) значения напряжения пробоя конденсатора от толщины SiHN

Известно, что сопротивление переключки после пробоя ($R_{вкл}$) зависит от величины пропускаемого тока, который обычно составляет 5-15 мА [8]. В нашем случае использовался импульс тока амплитудой 10 мА и длительностью 1 мс. После этого измерялось сопротивление конденсатора $R_{вкл}$. Результаты измерений $R_{вкл}$ для структур с различной толщиной SiHN представлены на рис. 4, где зависимости 1 и 2 относятся к максимальным $R_{вкл max}$ и минимальным $R_{вкл min}$ значениям соответственно. Из измерений следует, что значение и разброс величины $R_{вкл}$ снижается с уменьшением толщины SiHN, что связано с формированием более короткой «проводящей нити» (filament) в результате пробоя [8]. В исследуемом диапазоне толщин $R_{вкл}$ не превышает 70 Ом, а при толщинах SiHN < 220 Å выходит на величины $R_{вкл min} \sim 15-25$ Ом, что соответствует лучшим известным значениям для переключек данного типа.

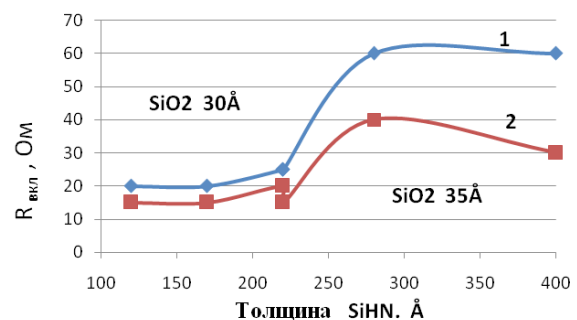


Рис. 4
Зависимость максимального (кривая 1) и минимального (кривая 2) значения сопротивления конденсатора после пробоя $R_{вкл}$ от толщины SiHN

Для переключек наряду с малым значением $R_{вкл}$ необходимо обеспечить значительную величину сопротивления $R_{выкл}$. Это особенно важно при использовании переключек в качестве элемента памяти однократно программируемого ПЗУ большой ёмкости (>10⁶ бит). В этом случае ток утечки через элемент программирования будет определять ток потребления ПЗУ в статическом состоянии. Зависимость тока утечки через конденсатор от толщины SiHN исследовалась при напряжении 3,3 В. Выбранное значение характерно

для напряжения питания КМОП БИС, изготовленных по проектным нормам 0,35 мкм. Результаты представлены на рис. 5. Для толщин больше 220 Å зафиксированы минимальные значения величины тока утечки и её разброса, что соответствует значению $R_{\text{выкл}} \sim 6 \cdot 10^{10}$ Ом. При меньших толщинах SiHN ток утечки может достигать $5 \cdot 10^{-10}$ А, что соответствует значению $R_{\text{выкл}} \sim 6 \cdot 10^9$ Ом, что также удовлетворяет критериям использования данных перемычек.

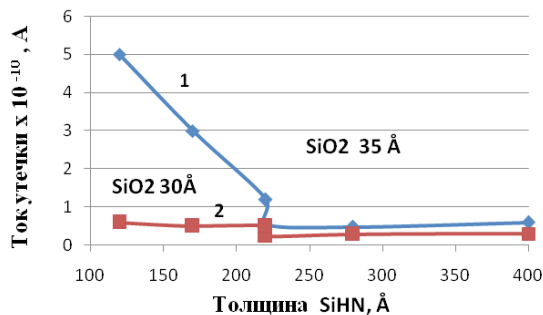


Рис. 5

Зависимость максимального (кривая 1) и минимального (кривая 2) значений тока утечки конденсатора от толщины SiHN

Для оценки стабильности структуры перемычек исследовалась зависимость тока утечки (среднее значение) конденсатора от температуры для различных толщин SiHN при приложенном напряжении 3,3 В. Результаты представлены на рис. 6. Зависимости соотносятся к следующим толщинам SiHN: 1 – 120 Å, 2 – 160 Å, 3 – 220 Å, 4 – 280 Å, 5 – 400 Å соответственно. Наблюдается резкое увеличение тока утечки конденсатора с ростом температуры при толщине SiHN 120 Å. В остальных случаях увеличение тока утечки незначительно.

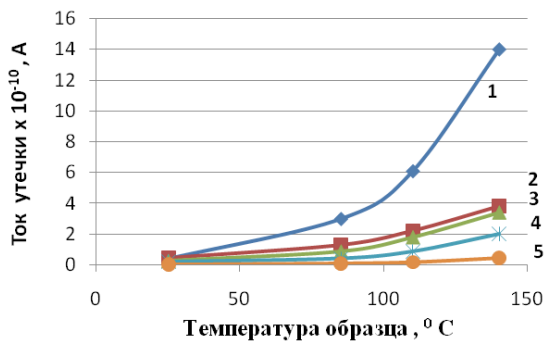


Рис. 6

Зависимость тока утечки конденсатора от температуры при различных толщинах SiHN: 1 – 120 Å, 2 – 160 Å, 3 – 220 Å, 4 – 280 Å, 5 – 400 Å

Выводы

Исследованы электрофизические параметры конденсаторов со структурой W-SiHN-SiO₂-SiHN-TiN-AL и суммарной толщиной диэлектрика в диапазоне 120-400 Å, осаждаемого с использованием оборудования, применяемого для формирования металлизации КМОП БИС. Показано, что значения напряжений пробоя конденсаторов 6,5-7,5 В могут быть получены при толщинах SiHN ~220 Å и SiO₂ ~35 Å соответственно. При этом ток утечки конденсаторов при напряжении 3,3 В не превышает значений $2 \cdot 10^{-10}$ А и сохраняется при температурах до 140 °С. Сопротивление такого конденсатора после воздействия импульса тока 10мА-1мс менее 30 Ом. Полученные результаты позволяют формировать однократно программируемые элементы переключения типа МИМ-перемычек с параметрами $U_{\text{пр}} \sim 6,5 - 7,5$ В, $R_{\text{выкл}} > 10^{10}$ Ом и $R_{\text{вкл}} < 30$ Ом, что удовлетворяет требованиям ПЛИС и однократно программируемых ПЗУ большой ёмкости.

Литература

1. Майская В. Программируемые логические схемы. Наступает эпоха перемен // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2004. – №4. – С. 10-19.
2. Elodie Ebrard, Bruno Allard, Philippe Candelier, Patrice Waltz. Review of fuse and antifuse solutions for advanced standard CMOS technologies // Microelectronics Journal. – 40 (2009). – P. 1755-1765.
3. Котельников Е. Программируемая логика Actel // Электронные компоненты. – 2010. – №9. – С. 88-93.
4. Карпов С. Actel: Новые технологии, передовые решения // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2007. – № 7. – С. 78-79.
5. Michail J. Hart et al Multilayer amorphous silicon antifuse // Патент США № 5726484. 10.03.1998.
6. Бабкин С. И. Процесс осаждения плёнок аморфного кремния, интегрированный в технологию многоуровневой металлизации КМОП БИС / С. И. Бабкин, А. С. Трохин, А. С. Новоселов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2013. – Вып. 1 (230). – С.17-21.
7. Handbook of Chemical Vapor Deposition (CVD). Principles, Technology and Applications. – Second Edition by Hugh O. Pierson. – 1998. – Norwich, New York, U.S.A.
8. N. Vasudevan et al ON-state reliability of amorphous-silicon antifuses // Journal of Applied Physics. – Vol 84. – № 11 1998. – P. 6440-6447.