

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ МЕТАЛЛИЗАЦИИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ ЦИФРОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Винник М. А., Кривец К. А., Ловшенко И. Ю., Новиков П. Э., Корсак К. В., Степанов А. А.
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Национальный детский технопарк
Минск, Республика Беларусь
E-mail: lovshenko@bsuir.by

В работе исследуется влияние выбора материалов металлизации на надёжность ячеек статической памяти. В качестве ключевого параметра используется статический запас по шуму (SNM). Проведён сравнительный анализ SNM для семи приборных структур с различными материалами металлизации: медь, алюминий, вольфрам, никель, кобальт, золото и серебро. Установлено, что медь обеспечивает наивысшее значение SNM (0,289 В), что подтверждает её статус оптимального материала для современных интегральных схем. Результаты работы подчёркивают важность учёта параметров материала при проектировании цифровых микросхем с повышенной надёжностью.

ВВЕДЕНИЕ

На ранних этапах развития микроэлектроники алюминий стал стандартным материалом для межсоединений в интегральных схемах благодаря относительной простоте технологий осаждения и совместимости с кремнием. Однако по мере перехода к нанометровым технологическим нормам, сопровождающему уменьшением сечения проводников и увеличением плотности тока, фундаментальными ограничениями алюминия являются высокое удельное сопротивление и низкая стойкость к электромиграции, что со временем стало критическим. Эти недостатки привели к росту задержек сигнала, увеличению тепловых потерь и, в целом, к снижению надёжности микросхем.

Естественным решением этой проблемы стала замена алюминия на медь, которая обладает гораздо меньшим удельным сопротивлением и значительно лучшей устойчивостью к электромиграции. Это началось с перехода на процессы по нормам 90 нм, что потребовало кардинальной перестройки технологий, например, внедрения барьерных слоёв [1-3]. Тем не менее, поиск оптимальных материалов для металлизации не остановился на меди. В условиях постоянного стремления к повышению энергоэффективности и надёжности цифровых схем, особенно в элементах памяти, актуальным становится вопрос о влиянии не только основного проводникового материала, но и альтернативных вариантов, таких как золото, серебро, кобальт или никель, на ключевые эксплуатационные характеристики.

I. ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ ЯЧЕЕК ПАМЯТИ

Надёжность ячеек памяти при чтении данных становится критически важной в современных нанометровых технологиях. Повышенная вариативность характеристик элементов памяти делает их более чувствительными к шумам и увели-

чивает разброс параметров, что в итоге снижает общую надёжность. В последнее время перспективным направлением для энергоэффективных устройств стало использование подпорогового режима работы памяти. Однако ключевой проблемой такого подхода является обеспечение стабильного чтения и записи. Снижение напряжения питания, часто применяемое для уменьшения энергопотребления, ещё больше усугубляет проблему надёжности. Таким образом, стабильность работы энергоэффективных ячеек памяти при чтении становится одним из важнейших требований [4]. Статический запас по шуму (англ. Static Noise Margin – SNM) – это мера устойчивости ячейки памяти к сохранению своих данных при наличии шума. SNM определяется как минимальное напряжение, присутствующее на битовых линиях без информационного сигнала, необходимое для изменения состояния ячейки. Существует два метода измерения SNM: графический подход, в котором SNM определяется как длина максимально возможного квадрата, вписанного в передаточную характеристику, и второй подход, предполагающий использование источников шума (в виде источников напряжения) на битовых линиях [5]. Для каждой конструкции построены передаточные характеристики графическим методом, и методом полного перебора рассчитан SNM. Качественный вид передаточной характеристики при операции чтения для каждой структуры является одинаковым и, в качестве примера, на рисунке 1 приведена передаточная характеристика одной из рассматриваемых структур. Выходное и входное напряжение обозначается как напряжение в точках int1 и int2, соответствующих разным битовым линиям. SNM измеряется в вольтах и характеризует способность ячейки сохранять данные при воздействии шума. Чем выше значение SNM, тем устойчивее ячейка.

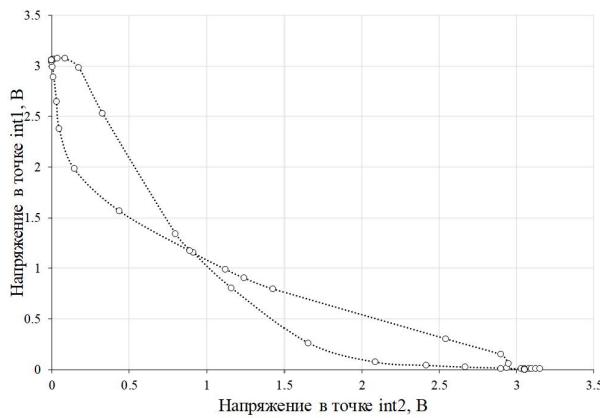


Рис. 1 – Типовая передаточная характеристика
(структура № 2)

II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

Исследовано влияние материалов металлизации на надёжность ячеек памяти при чтении данных посредством математического моделирования в среде Silvaco. Ячейка памяти представляет собой стандартную 6Т реализацию [6], при моделировании исследовалось ее 3D-представление (рисунок 2). В исследуемой приборной структуре можно выделить 4 слоя металлизации. В таблице 1 представлены сочетания используемых материалов слоев металлизации, а также значения рассчитанных SNM для всех рассматриваемых приборных структур.

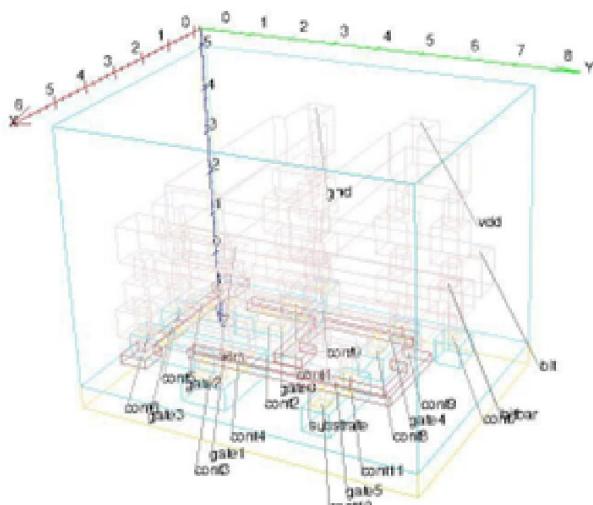


Рис. 2 – 3D-представление 6Т ячейки памяти

Проведённый анализ данных показал, что выбор материала металлизации оказывает значительное влияние на надёжность ячейки памяти. Наибольшее значение SNM составляет 0,289 В и было получено при использовании меди во всех слоях металлизации. Это в первую очередь свя-

зано с её низким удельным сопротивлением, что минимизирует паразитные падения напряжения и тепловые шумы.

Таблица 1 – Варьирование материалов каждого слоя металлизации для приборных структур

Номер структуры	Материал металлизации	SNM, В
1	Медь	0,289
2	Алюминий	0,267
3	Вольфрам	0,231
4	Никель	0,270
5	Кобальт	0,266
6	Золото	0,275
7	Серебро	0,277

Среди остальных материалов наилучшие результаты показали серебро (0,277 В) и золото (0,275 В), что также объясняется их высокой проводимостью. Однако их применение в массовом производстве ограничено из-за высокой стоимости и технологических сложностей при реализации в традиционных кремниевых технологиях. Алюминий и кобальт продемонстрировали схожие значения SNM, 0,267 В и 0,266 В соответственно, что делает их приемлемыми альтернативами при определенных технологических ограничениях. Никель (0,270 В) показал немного лучший результат по сравнению с алюминием. Наименьшее значение SNM равно 0,231 В и было получено при использовании вольфрама, что обусловлено его относительно высоким сопротивлением и меньшей подвижностью носителей заряда.

Таким образом, для обеспечения максимальной надёжности ячеек памяти при чтении предпочтительным выбором остаётся медь, несмотря на определённые технологические ограничения, связанные с производством микросхем с металлизацией на ее основе.

1. Amrutur, B. S. Speed and Power Scaling of SRAM's / B. S. Amrutur, M. A. Horowitz // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2000. – V. 35, № 2. – P. 175–185.
 2. Andricacos, P. C. Copper on-chip interconnections: A breakthrough in electrodeposition to make better chips / P. C. Andrianos // The Electrochemical Society Interface. – 1999. – V. 8, № 1. – P. 32.
 3. Copper interconnection integration and reliability / C-K. Hu, B. Luther, F. B. Kaufman [et al.] // Thin Solid Films. – 1995. – V. 262, № 1-2. – P. 84-92.
 4. Gul, W. SRAM cell design challenges in modern deep sub-micron technologies: An overview / W. Gul, M. Shams, D. Al-Khalili // Micromachines. – 2022. – V. 13, № 8. – P. 1332.
 5. Gadhe, A. Read stability and Write ability analysis of different SRAM cell structures / A. Gadhe, U. Shirode // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). – 2013. – V. 3, № 1. – P. 1073–1078.
 6. Osada, K. «Low power and reliable SRAM memory cell and array design» / K. Osada // Springer Series in Advanced Microelectronics. – 2011. – V. 31. – P. 5-10.