

Применение Dual-beam технологии для создания прототипа матрицы энергонезависимой памяти на фазовых переходах

Ю.В. Ануфриев, Е.В. Зенова, П.К. Кондратьев, Д.С. Балашов, С.М. Сальников,

Учреждение Российской академии наук институт нанотехнологий микроэлектроники РАН,

www.inme-ras.ru, hf_hf@newmail.ru

Аннотация — В статье рассматривается один из возможных способов создания прототипа матрицы ячеек энергонезависимой памяти с использованием Dual-beam технологии. Предложенная технология в будущем позволит изготавливать матрицы энергонезависимой памяти на фазовых переходах, внедренных в структуру СБИС.

Ключевые слова — Энергонезависимая память, PRAM, Dual-beam, FEI, наноразмерная.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современная технология изготовления СБИС позволяет создавать матрицы энергонезависимой памяти объемом до 32 Гбайт на одном кристалле. При этом размер запоминающей ячейки (транзистор с плавающим затвором) приблизился к своему технологическому пределу – 30 нм [3]. Одновременно с этим, существенно усложнилась технология изготовления полупроводниковых структур и повысилась их себестоимость [7].

Производители микроэлектронных устройств для Flash-памяти, такие как Intel, Samsung, ST Electronics и др., в последние несколько лет активно занимаются разработкой принципиально новых ячеек для хранения информации, отличных от базирующихся на сохранении заряда. Весьма перспективной считается технология хранения данных в ячейках памяти, основанных на различии свойств проводимости кристаллической и аморфной фаз халькогенидного стеклообразного полупроводника (ХСП). Такая память получила название Phase Random Access Memory (PRAM) или память на фазовых переходах [1].

II. ОПИСАНИЕ ПРИНЦИПА РАБОТЫ ЗАПОМИНАЮЩЕЙ ЯЧЕЙКИ

В кристаллической фазе халькогенидный сплав $\text{Ge}_x\text{Sb}_x\text{Te}_x$ (GST) является вырожденным полупроводником р-типа и обладает высокой электропроводностью; это состояние принято обозначать (“Set”) [1]. В аморфной фазе GST является высокоомным материа-

лом, это состояние принято обозначать как (“Reset”). Различие проводимости между двумя фазами материала - несколько порядков. Переход из аморфной в кристаллическую фазу происходит в момент, когда приложенное напряжение достигает порогового значения V_{th} [4]. При этом протекающий через ячейку ток разогревает ячейку до температуры кристаллизации. Аморфизация происходит под действием короткого импульса напряжения с большой амплитудой и резким задним фронтом, при этом происходит расплавление запоминающей области ячейки и затем резкое охлаждение. Вольтамперная характеристика запоминающей ячейки показана на рис. 1.

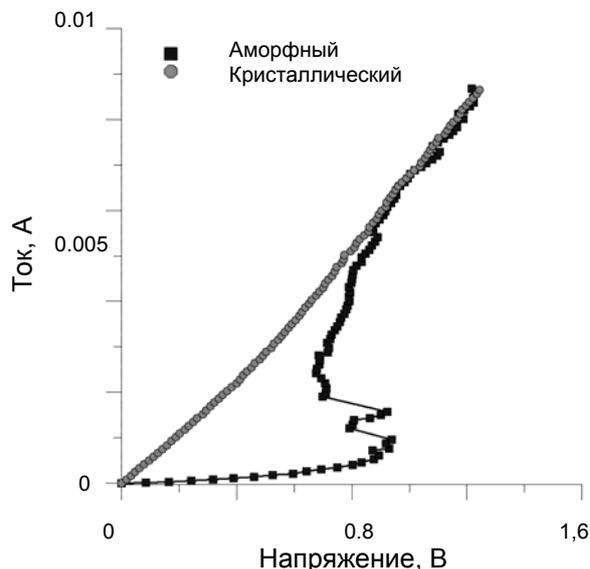


Рис. 1. Вольтамперная характеристика элемента памяти на фазовых переходах

На рис. 2 представлена зависимость сопротивления во включенном (“Set”) и выключенном (“Reset”) состояниях от тока записи [6].

По заявлению разработчиков, данный тип памяти способен выдерживать 10^{10} циклов перезаписи и обеспечивать хранение информации более 120 лет при

температуре 100°C. Размеры запоминающей ячейки порядка 30 нм. Время записи ~60 нс, время стирания ~150 нс. Время чтения ~10 нс [3].

Согласно теории, описывающей переключение элементов памяти данного типа [4] стадия переключения начинается с образования токового шнура между электродами, который разогревает прилегающую к нему область ХСП, кристаллизуя ее. Таким образом, для нормальной работы ячеек памяти необходима локализация материала активной области в диэлектрической поре. В свою очередь, размер поры будет определять ток и напряжение стирания ячейки.

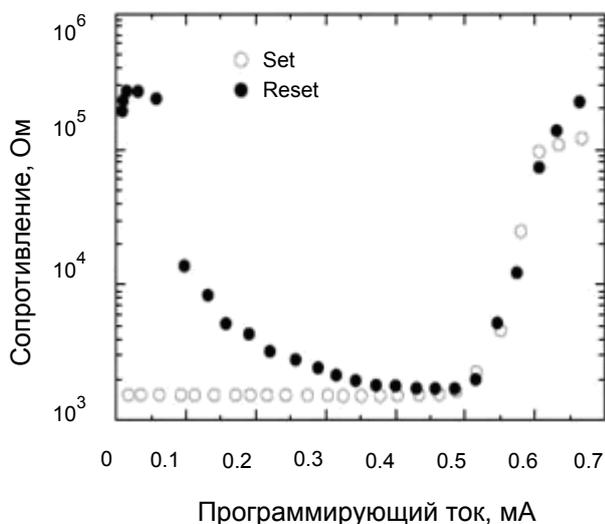


Рис. 2. Зависимость сопротивления от тока записи во включенном и выключенном состоянии [2]

Двухлучевая технология, использующая электронный луч для навигации по образцу и ионный пучок для травления и нанесения различных материалов, идеально подходит в качестве технологического оборудования для изготовления тестовых полупроводниковых структур такого типа памяти. На рис. 3 представлена структура ячейки PRAM памяти, предложенная фирмой Ovonix [5].

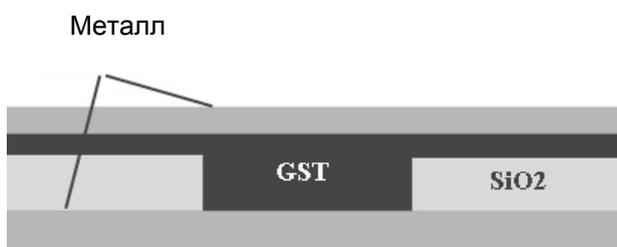


Рис. 3. Ячейка памяти на фазовых переходах

Несмотря на то, что за последние несколько лет разработчики полупроводниковых схем несколько усложнили конструкцию запоминающей ячейки,

принцип функционирования остался неизменным. По всей видимости, усложнение конструкции ячейки памяти, предложенное компанией Intel [2], а именно добавление нагревательного элемента, скорее аргументировалось недостаточным пониманием принципов работы данного типа запоминающих устройств и помогло разработчикам разрешить ряд проблем ценой значительного усложнения технологии.

Последние исследования, проводимые в области свойств ХСП, помогли создать достаточно точную модель, описывающую функционирование памяти на фазовых переходах [4].

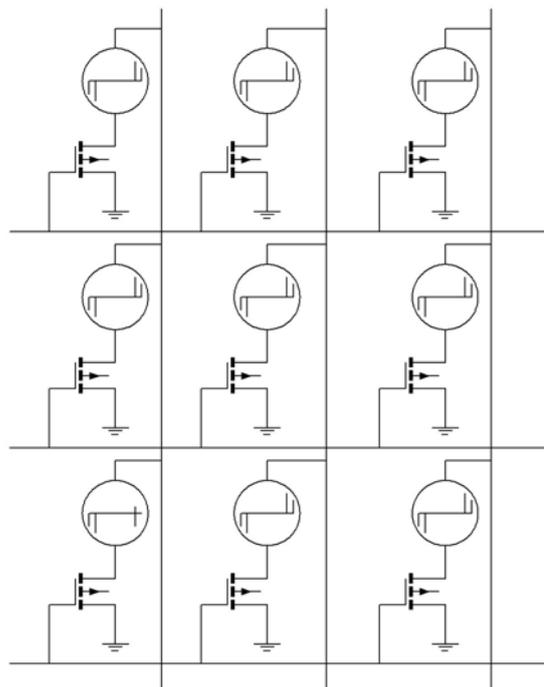


Рис. 4. Структура матрицы памяти

В данной статье рассматривается достаточно простая технология изготовления прототипа матрицы (см. рис. 4) PRAM памяти, которая по функциональным характеристикам не будет уступать современным элементам Flash-памяти. При этом может использоваться стандартная электрическая схема чтения, записи, и адресации, применяемая в современных устройствах Flash-памяти. В отличие от современных EEPROM-устройств, запоминающие ячейки PRAM располагаются над транзисторами схемы управления и не требуют дополнительного экранирования.

III. ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ МАТРИЦЫ ПАМЯТИ

А. Роль травления в технологии создания матрицы памяти.

Одним из ключевых процессов создания матрицы памяти является ионно-стимулированное травление.

Суть этого процесса заключается в следующем. При бомбардировке поверхности вещества ионами, например, аргона с энергией 200-500 эВ происходит физическое распыление поверхности твердого тела. В микроэлектронике этот процесс трактуется как ионно-лучевое травление и характеризуется скоростью

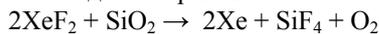
$$V_{ph}=dh/dt,$$

где h – толщина материала.

Существенный вклад в ускорение процесса травления вносит эффект разрыхления поверхности, ведущий одновременно к разрушению связей и образованию каналов, по которым химические реагенты поступают в более глубокие слои. Результаты современных исследований по ионно-стимулированному газовому травлению поверхности кремния с использованием бомбардировки тяжелыми частицами, в частности, ионами Ga^+ , стали отправными при создании систем типа NovaNanoLab 600.

В настоящее время в промышленности используются следующие фториды ксенона XeF_2 , XeF_4 , XeF_6 .

Использование ионно-стимулированного травления можно разделить на несколько направлений: селективное травление, ускоренное травление, декорирование. С участием реагента XeF_2 осуществляется селективное травление диэлектриков:



В результате получается доступ к токоведущим шинам, расположенным под слоем диэлектрика, без их разрушения, что позволяет наносить слои халькогенидного полупроводника и заполнять им вскрытые контактные окна. Затем можно осуществить контактирование к верхнему слою ХСП.

Применение фокусированного ионного пучка и газовой инжекционной системы, позволяет разработчикам интегральных схем создавать на микроуровне токопроводящие цепи и локальные защитные покрытия. Данная технология обеспечивает широкие возможности для разработки и исследования прототипа индивидуальных областей ячеек энергонезависимой памяти.

Б. Технологический маршрут

Рассмотрим технологический маршрут с использованием двухлучевой системы, включающей в себя ионную (FIB) и электронную (SEM) пушки, например, Nova 600 NanoLab – DualBeam установка от FEI:

1. Изготовление нижнего проводящего контакта. В данном случае материал должен быть тугоплавким. Al не подходит, поскольку его температура плавления близка к температуре плавления GST. Как правило, производители используют нитрид титана. Контакт может быть выполнен как по шаблону в виде отдельных проводников, так и в виде сплошного проводящего слоя.

2. Нанесение слоя диэлектрика. В качестве диэлектрика рекомендуется использовать диоксид кремния или нитрид кремния. Нанесение слоя диэлектрика

возможно либо напылением в технологической установке, либо локальным нанесением непосредственно в камере FIB-станции.

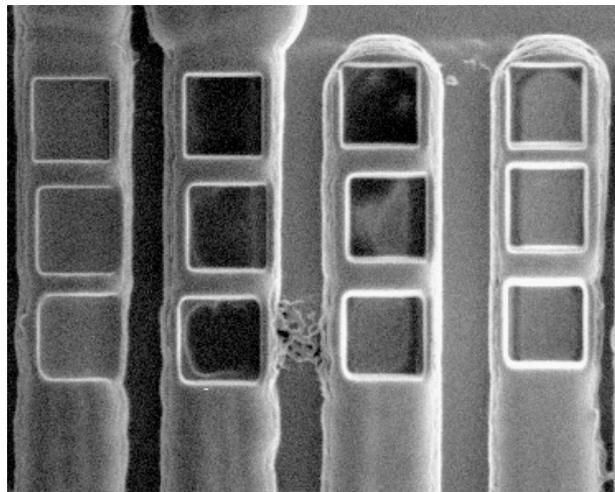


Рис. 5. Пример изготовления пор в диэлектрике к нижнему слою металлизации

3. Изготовление ионным пучком массива отверстий (пор) для заполнения материалом активного слоя (рис. 5).

4. Термическое или магнетронное напыление халькогенидного полупроводника (аморфная фаза).

5. Вскрытие контактных окон к нижнему слою металлизации.

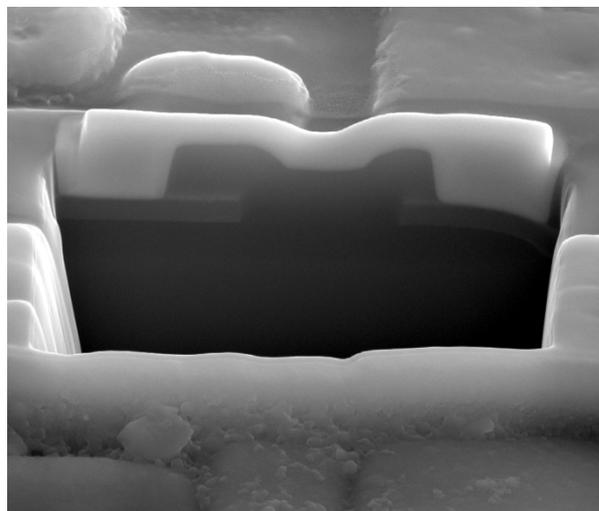


Рис. 6. Кросс-секция контактов

6. Изготовление с помощью FIB-станции металлических контактов к материалу активной области (рис.6).

7. Трассировка верхнего слоя металлизации к внешним контактными площадкам (рис. 7).

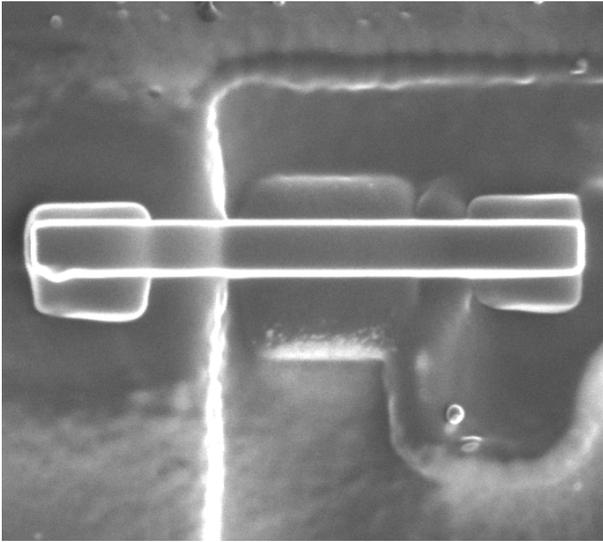


Рис. 7. Трассировка верхнего слоя металлизации при помощи FIB

В. Особенности воздействия на вещество ионным пучком

Характеризуя выбранную технологию, следует выделить следующие особенности ионного пучка как средства воздействия на вещество:

- возможность фокусировки ионного пучка в тонкий луч с наноразмерными геометрическими параметрами, что наряду с малой длиной пробега ионов в твёрдом теле предопределяет возможность получения высокого пространственного разрешения;
- малый угол сходимости пучка обеспечивает большую глубину резкости, что в сочетании с высоким разрешением, позволяет получить высокое качество изображения;
- эффективное взаимодействие ионного пучка с веществом, находящимся не только в твёрдом, но и в газообразном состоянии, благодаря чему могут быть реализованы стимулированные процессы травления и осаждения;
- возможность гибкого управления ионным пучком в пространстве и во времени, что определяет малые времена адаптации ионно-лучевого технологического комплекса для решения задач наноразмерной обработки по заданной геометрии;
- малый ток ионного пучка, на три порядка меньший, чем типичный ток пучка электронов, позволяет избежать негативных последствий, связанных с изменениями, происходящими в образце под действием пучка, и уменьшить влияние зарядки поверхности не проводящих образцов;
- большая масса ионов по сравнению с электронами существенно уменьшает влияние дифракции и увеличивает сечение рассеяния на атомах исследуе-

мого материала, благодаря чему увеличивается контраст по атомному номеру, как в режиме регистрации вторичных электронов, так и при регистрации обратно-рассеянных ионов;

- возникновение при взаимодействии ионного пучка с веществом вторичных электронов и ионов, что определяет возможность наблюдения результата процесса обработки с высоким пространственным разрешением непосредственно в технологической камере в микроскопическом режиме с представлением информации в цифровой форме.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Был продемонстрирован технологический маршрут прототипа матрицы запоминающих ячеек PRAM с использованием двулучевой технологии.

В результате данной работы на кремневой подложке по предложенной технологии был изготовлен тестовый массив, состоящий из 12 запоминающих ячеек. Размер ячейки памяти 40x40 нм, толщина активной области 50 нм, расстояние между ячейками составляет порядка 40 нм. Управление осуществляется через контактные площадки.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Lacaita A.L. Phase change memories: State-of-art, challenges and perspective // *Solid-State Electronics*. 2006. V. 50. P. 24 – 31.
- [2] Ferdinando Bedeschi et al., 4-Mb MOSFET-Selected Trench Phase-Change Memory Experimental Chip // *IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS*. JULY, 2005. V. 40, NO. 7.
- [3] R.Katsumata et al., Pipe-shaped BiCS Flash Memory with 16 Stacked Layers and Multi-Level-Cell Operation for Ultra High Density Storage Devices // *Sympo. VLSI Tech*. 2009. P.136-137.
- [4] Voronkov E. N. Calculation of threshold voltage for phase-change memory device // *J. Non-Cryst. Solids*. 2007. V. 353. P. 2591-2594.
- [5] S.R.Ovshinsky, H. Fritzsche. Amorphous semiconductors for switching, memory, and imaging applications // *Electron Devices, IEEE Transactions*. 1973. V. 20. V. 2. P. 91-105.
- [6] Ануфриев. Ю.В. Температурная зависимость напряжения включения ячеек энергонезависимой памяти на основе халькогенидных полупроводников // *Вестник Московского Энергетического института*. М.: МЭИ, 2007. №6. С. 144-147.
- [7] Rich Liu et al, Reliability of Barrier Engineered Charge Trapping Devices for Sub-30nm NAND Flash // *IEDM Tech. Dig*. 2009. P. 745-748.