

УДК 622.734.001.57

М. В. Близно

Государственное учреждение «Институт проблем искусственного интеллекта», г. Донецк
83048, г. Донецк, ул. Артема, 118-б

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ

M. V. Blizno

Public institution «Institute of Problems of Artificial intelligence», Donetsk
83048, Donetsk, Artemast., 118-b

STUDY OF REGULARITIES OF DEVELOPMENT OF THE NON-VOLATILE MEMORY

М. В. Близно

Державна установа «Інститут проблем штучного інтелекту», м. Донецьк
83048, м. Донецьк, вул. Артема, 118-б

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ РОЗВИТКУ ЕНЕРГОНЕЗАЛЕЖНОЇ ПАМ'ЯТІ

В работе представлен информационный материал по энергонезависимой памяти, используемой в компьютерной индустрии, а также закономерности её развития.

Ключевые слова: ПЗУ, Flash, энергонезависимая память, флэш-память.

The article presented informational material for non-volatile memory used in the computer industry, as well as regularities of its development.

Keywords: ROM, Flash, nonvolatile memory, flash memory.

У роботі представлений інформаційний матеріал по незалежній пам'яті, використовуваної в комп'ютерній індустрії, а також закономірності її розвитку.

Ключові слова: ПЗУ, Flash, незалежна пам'ять, флеш-пам'ять.

Введение

Компьютерная техника стремительно развивается и имеет огромные темпы роста. И на сегодняшний день она стала частью повседневной жизни, хотя несколько десятилетий назад была доступна лишь не многим. Одной из основной составляющей компьютера является память, в частности энергонезависимая. Развитие памяти напрямую зависело от развития компьютерной индустрии в целом и сегодня развитие памяти не стоит на месте. Производители ведут постоянную работу над усовершенствованием энергонезависимой памяти, увеличивая её объём и при этом уменьшая габаритные размеры. Изобретают новые технологии, меняют материалы и принципы записи, чтения, обработки информации.

Целью данной статьи является проведение исследования для выявления закономерностей развития энергонезависимой памяти.

Общие сведения об энергонезависимой памяти

Под энергонезависимой памятью подразумевается любое устройство, способное хранить записанные данные при отсутствии питания.

Существует множество типов энергонезависимой памяти, среди которых:

1. Масочные ПЗУ – являются самыми надежными и обладают самым большим быстродействием, а также имеют самое малое энергопотребление. Недостатком является то, что программируется один раз под заказ на производстве.
2. Однократно программируемые ПЗУ – могут однократно программироваться потребителем, обладают большим быстродействием, имеют средний объём памяти. Недостатками являются средняя надежность и большой потребляемый ток.
3. Многократно программируемые с ультрафиолетовым стиранием – обладают возможностью перепрограммироваться до 10 тысяч раз. Недостатками являются среднее быстродействие, большое электропотребление, необходим специальный программатор и специальный стиратель.
4. Многократно программируемые
 - а. На ЦМД – обладают огромным объёмом памяти, но при этом имеют низкое быстродействие и последовательный доступ.
 - б. На ПОК на халькогенидах PRAM – имеют огромный объём памяти, вместе с этим и низкое быстродействие, а также для них требуется оптическая система.
 - в. На магнитных сердечниках.
 - г. На твисторах.
 - д. КМОП с плавающим затвором (flash).
 - е. На сегнетоэлектриках (FRAM).
 - ж. На магниторезистивных спиновых вентилях (MRAM).
 - з. Nano-RAM – на нанотрубках Nantero.
 - и. FJG RAM от Oriental Semiconductor.
 - к. domain-wall memory (DWM) от IBM – основана на перемещении магнитных доменов в нанотрубках с помощью спиновых токов.

Развитие энергонезависимой памяти на базе полупроводников

Устройства хранения данных, которые используются в современных компьютерных системах, появились в 1970-е годы с развитием индустрии полупроводников. Твёрдотельная память (RAM, SRAM, DRAM) и флэш-память (EPROM) основывалась на использовании транзисторных электронных устройств, а механическая память (магнитные ленты и диски) – магнитных накопителей. Эти два типа устройств хранения просуществовали поразительно долго, и в соответствии с законом Мура каждые два года удваивалась плотность записи и вдвое уменьшалась стоимость. Изменчивость этих технологий во многом способствовала появлению все более сложных компьютерных устройств.

Первая твёрдотельная энергонезависимая память была разработана в 1969 году инженерами из компании RadiationInc. Они разработали память типа PROM (Programmable Read Only Memory), основываясь на разработках диодных матриц. Этот тип памяти был выполнен в виде двумерной матрицы проводников, на пересечении которых создавалась тонкая перемычка (20-30 мкм) из металла или аморфного кремния. Программирование микросхем заключалось в следующем: через соответствующую перемычку пропускался импульс электрического тока большой величины, который заставлял ее расплавиться. Вероятность того, что перемычка восстановится, крайне мала, но для большей надежности и исключения возможности восстановления, микросхема подвергалась термотренировке (дополнительному нагреву в течение длительного времени), а затем проверялась и при необходимости повторно программировалась.

Вскоре эта память обрела популярность и начала производиться во многих больших государствах.

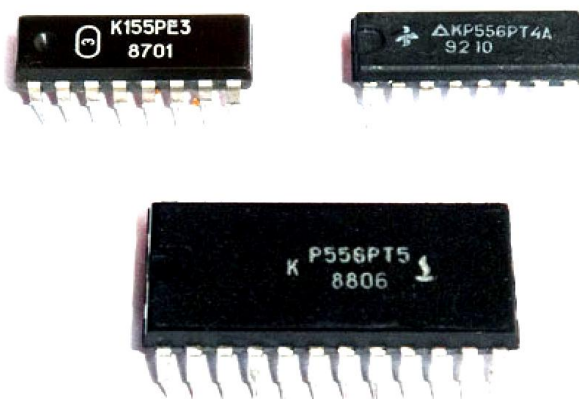


Рисунок 1 – PROM, которые находили наибольшее применение в радиолюбительской практике и цифровой электронике

Преимуществом этих микросхем было высокое быстродействие. Возможность программирования пользователем. А недостатком – однократная запись информации и невозможность ее изменения.

Следующим шагом в развитии было случайное открытие, совершенное в 1971 году Довом Фрохманом из компании Intel, во время тестирования бракованной партии микросхем INTEL 1101, которые при температуре 85 градусов и влажности 85% теряли стабильность рабочие параметры. Проблема заключалась в исполь-

зуемом диэлектрике, он становился проводящим в условиях повышенной влажности. В технологии производства был допущен ряд ошибок, которые приводили к тому, что в слой диэлектрика в микросхеме попадали атомы металла. Используя новые свойства, был изобретен новый стандарт памяти EPROM. В новом чипе для сохранения информации использовалось особое движение электронов, а для стирания данных – мощное ультрафиолетовое излучение. Сейчас память EPROM можно встретить в микросхемах BIOS на компьютерах начала IT-эпохи, например, на популярном в те годы на Западе ZX Spectrum, более известном в странах СНГ под именем Magic.

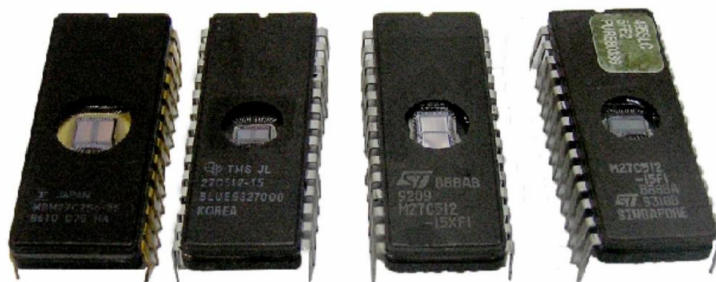


Рисунок 2 – Микросхемы EPROM памяти производства разных стран

Intel не остановилась на достигнутом и в 1978 выпустила микросхему Intel 2816, которая в своей структуре имела тонкий слой изоляции. Это позволило стирать информацию без помощи ультрафиолетовых лучей. Такие чипы получили название EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory). Но они обладали значительной проблемой: из-за сложностей с реализацией правильной подачи тока на тонкий слой диэлектрика, EEPROM была лишена возможности перезаписи. В итоге выпускалось два типа микросхем: с большой емкостью, но без возможности перезаписи и перезаписываемые, но с меньшей памятью.

Следующим этапом развития твердотельных энергонезависимых накопителей стала так называемая Flash-память, разработанная инженером компании TOSHIBA Фудзио Масукой. Он представил свое творение публике в 1984 году на конференции IEDM в Сан-Хосе, США. Его топология ячейки памяти кардинально отличалась от существующих. В основу такой памяти легла МОП (металл-оксид-полупроводник) структуры полевого транзистора.

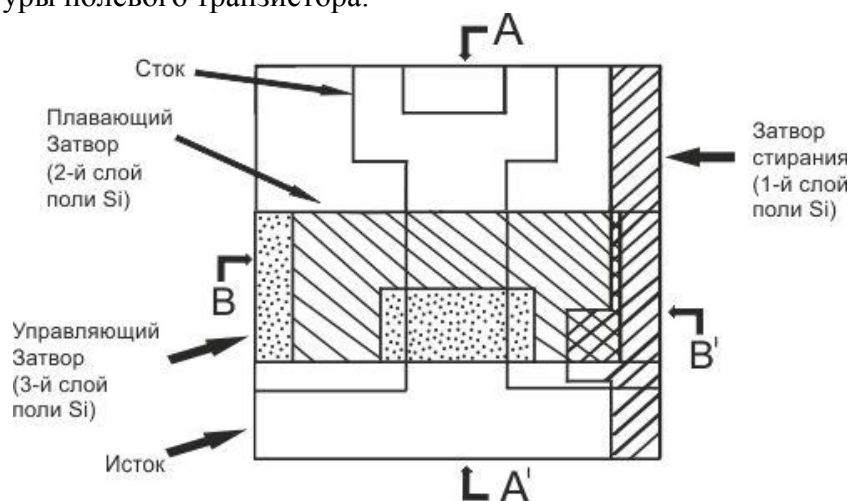


Рисунок 3 – Топология ячейки памяти, предложена Масукой

Используя свои наработки в технологии SAMOS, Фудзио Масуока создал ячейку памяти, для которой не было необходимости размещать дополнительный транзистор выборки, что позволяло увеличить объем хранимой информации на чипе при тех же размерах кристалла. Введение в ячейку памяти дополнительного затвора (затвора стирания) позволило увеличить количество циклов перезаписи ячейки памяти до 10 000 раз! (для сравнения, количество циклов перезаписи EPROM памяти – не более 500).

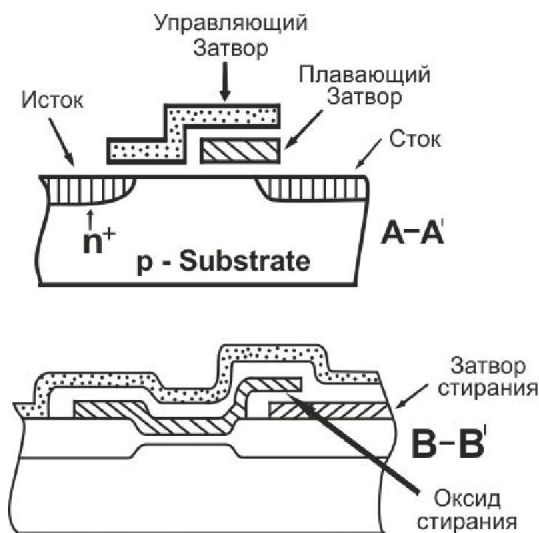


Рисунок 4 – Разрезы ячейки памяти

При создании ячейки использован ряд усовершенствований. В этой конструкции применен n-канальный МДП-транзистор с коротким (3,5 мкм) каналом и с поликремниевым управляющим затвором, расположенным над плавающим затвором. В зоне истока находится третий затвор – затвор стирания. Управляющий затвор своей поверхностью перекрывает плавающий затвор и область канала.

В 1985 году компания TOSHIBA впервые начала коммерческий выпуск Flash-памяти.

В 1987 году Фудзио Масуока представил новый тип чипа для хранения данных NAND Flash, объемом 256 Кбайт. В этой новой технологии хранения информации ячейки памяти были соединены в гирлянды, а программирование производилось не побитно, а побайтно. В отличие от Flash-памяти с архитектурой NOR, в данной Flash-памяти разработчики отказались от произвольного доступа к ячейке памяти, чтобы обеспечить лучшие характеристики показателя чтение/запись и создать высокую плотность хранения данных. Такой подход позволил разработчикам создать дешевый вариант твердотельной памяти, который мог найти применение в задачах, где необходимо хранить большие объемы данных.

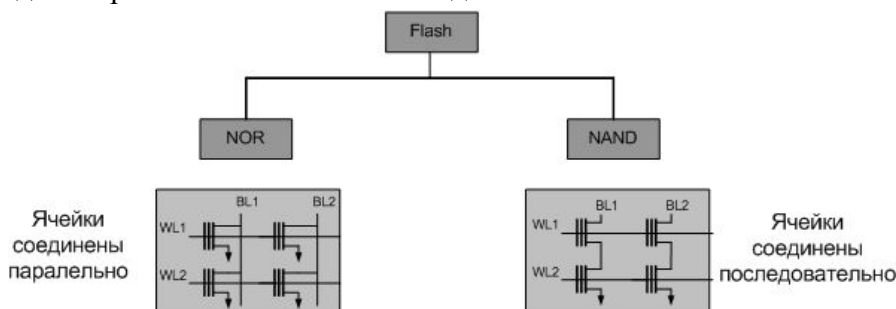


Рисунок 5 – Архитектура Flash-памяти

Используя новый технологический процесс, доктору Масуока удалось добиться малых (1мкм) размеров ячейки памяти. Площадь одной ячейки NAND-памяти занимала 44% от площади EPROM ячейки памяти, и 85% от площади первой ячейки NOR FLASH-памяти. И именно она стала основой для современных твердотельных накопителей, в частности для современных SSD.

В 1999 году компании SanDisk, Toshiba и Matsushita скооперировались и создали новый стандарт карт памяти – SD (*Secure Digital*). Secure (безопасный) был основным акцентом в имени нового стандарта – карточки получили поддержку DRM или, проще говоря, с их появлением стала возможна цифровая защита авторских прав. В первый год своего существования объединение трех компаний создало организацию SD Association, в которую подтянулись новые члены, среди которых были Intel, Kingston, Apple, AMD, Canon, Nikon, Samsung, Hewlett-Packard и другие. Максимальная емкость первых моделей SD-карточек была равна всего лишь 2 ГБ, но уже совсем скоро появились варианты на 4 ГБ, хотя их и было не так уж много в продаже.



Рисунок 6 – SD-карты памяти компании Kingston

На первых порах этого размера было вполне достаточно, но цифровая индустрия продолжала развиваться, объемы информации росли в геометрической прогрессии, и в определенный момент пользователи начали ощущать нехватку свободного пространства. В 2006 году было представлено второе поколение SD-накопителей, получившее название SDHC (*Secure Digital High Capacity*, или SD-карты с высокой емкостью), их максимальный объем был до 32 ГБ. У этого формата был один серьезный недостаток – отсутствие обратной совместимости, то есть они не подходили к старым кардридерам. Запросы пользователей продолжали расти, и нарастала необходимость в накопителях большей емкости. Таким образом появились SD-карты версии 3.01, или SDXC (*Secure Digitale Xtended Capacity*). Новинка актуальна по сей день, и может похвастаться номинально возможным объемом в 2 терабайта.

В 2000-х годах вслед за бурным развитием мобильных технологий пришла потребность в большем количестве памяти портативных девайсах. В них стали использоваться microSD-карты.



Рисунок 7 – microSD-карты памяти компании Kingston

Этот формат популярен и сегодня, а его характеристики при в 4 раза меньшем физическом размере, чем у SD-накопителей, не хуже аналогичных показателей. Также, проводя параллели с SD-картами, существуют microSDHC- и microSDXC-форматы, предлагающие аналогичные объемы вмещаемой информации.

Анализируя развитие твердотельных накопителей, можно заметить то, что объем памяти увеличивался, практически соответствуя закону Мура, что представлено на рис. 8.

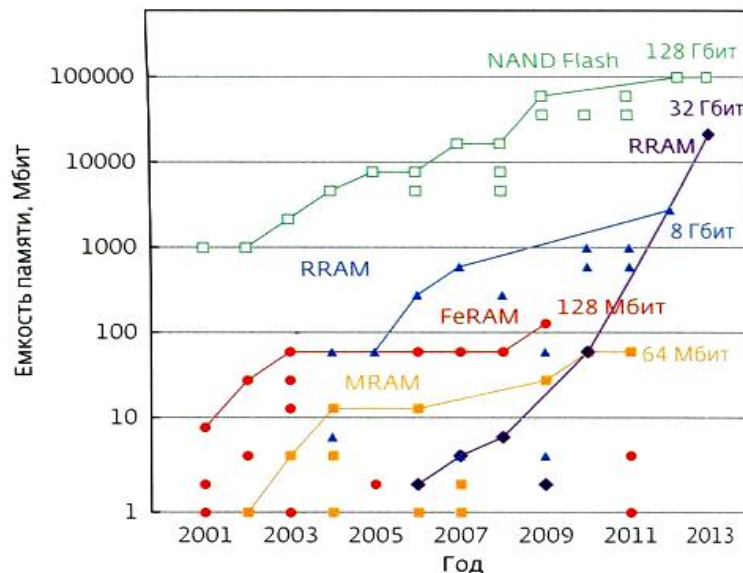


Рисунок 8 – Динамика развития различных типов энергонезависимой памяти

Увеличение памяти и модернизация производства самого чипа, при сохранении габаритных размеров, позволяет существенно экономить на производстве чипов. Тенденцию можно проследить, если проанализировать стоимость единицы объема с изменением времени. На сегодняшний день объем памяти накопителя измеряется гигабайтами. То за основную единицу расчета возьмем 1 гигабайт памяти. Результаты поражают. Цена снизилась с сотен тысяч до десятков центов.

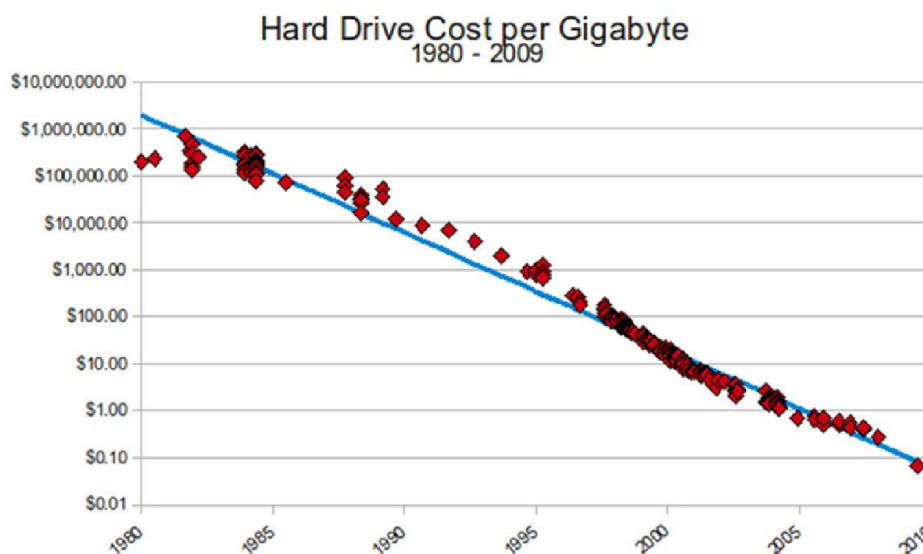


Рисунок 9 – Стоимость 1 Гб памяти со временем

Несмотря на то, что цена за единицу памяти падает, объём продаж постоянно растёт. Основной причиной роста является быстроразвивающийся рынок электронных устройств и потребность населения во все большем количестве памяти.

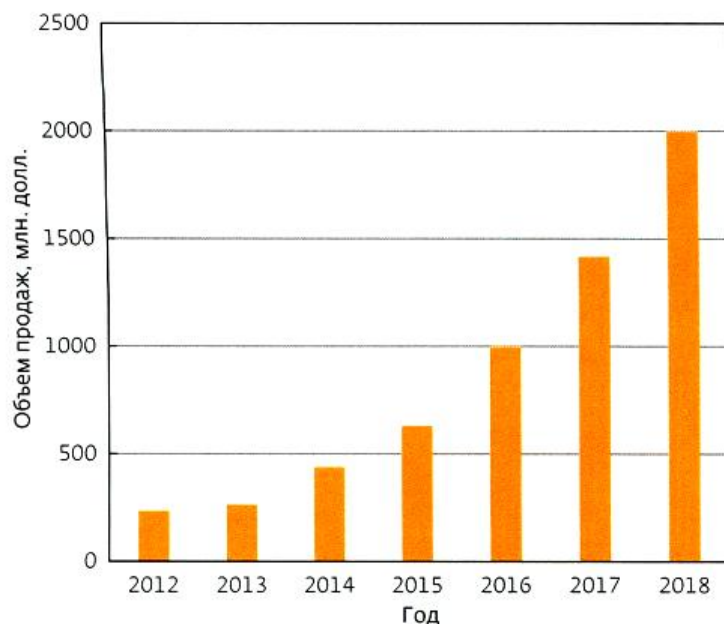


Рисунок 10 – Динамика рынка новых развивающихся схем энергонезависимой памяти

Дальнейшая перспектива развития энергонезависимой памяти предполагает появление новых, совершенно иных цифровых носителей информации. Так, компания *IM Flash Technologies* (IMFT) разработала кристалл NAND емкостью несколько терабит. Микросхема изготавливается по технологическим нормам 20 нм и состоит из нескольких кристаллов, расположенных стопкой друг над другом. Такая структура получила название «3D-флеш-памяти». Она позволила увеличить объём, не повлияв на производительность.

Еще одной альтернативной энергонезависимой памятью может стать полностью оптический чип, разрабатываемый учеными технологического института Карлсруэ, университетов Мюнстера, Оксфорда и Эксетера. Такая технология поможет значительно увеличить эффективность и быстродействие существующих систем. В основе разработок лежит использование уникального PSM-материала нового поколения $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST) – халькогенидного соединения, способного менять фазу кристаллической решетки с аморфной на кристаллическую и обратно под воздействием сверхкороткого импульсного лазерного излучения.

Заключение

Твердотельная энергонезависимая память успешно развивалась с момента зарождения компьютерной индустрии. Первооткрывателями зачастую являются обычные люди, которым дали возможность самореализоваться. И на них развитие не остановится. В ближайшем будущем появятся новые носители информации. И те устройства, которые мы сегодня используем, станут пережитком прошлого.

Список литературы

1. История развития флеш-памяти [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://se7en.ws/istoriya-gazvitiya-flesh-pamyati/>
2. История флеш накопителей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.entar.com.ua/ru/statji/istoriya-flesh-nakopitelej.html>
3. Энергонезависимая основная память становится реальностью [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://citforum.ru/computer/2013-08/>
4. Гук М. Ю. Аппаратные средства IBMPC. Энциклопедия [Текст] / Гук М. Ю. – 3-е изд. – СПб.: Питер, 2006. – 1072 с.: ил. ISBN 5-469-01182-85.
5. Перспективные технологии производства памяти. Современное состояние [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/06_12/stat_78.htm
6. Энергонезависимая память сделана из того, сего и еще чего-то [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nickhome.ru/scientist/physics/251-energonezavisimaya-pamyat-sdelana-iz-togo-sego-i-esche-chego-to.html>
7. Akira Goda, Krishna Parat. Scaling Directions for 2D and 3D NAND Cells [Текст] / Akira Goda, Krishna Parat// IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). – 2012. – P. 2.1.1-2.1.4
8. Запоминающие устройства: классификация, принцип работы, основные характеристики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://automationlab.ru/index.php/2014-08-25-13-20-03/435-10>
9. Внешние накопители информации: предназначение, разновидности и основные характеристики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://computerologia.ru/vneshnie-nakopiteli-informacii-prednaznachenie-raznovidnosti-i-osnovnye-kharakteristiki/>
10. Создан первый оптический чип энергонезависимой памяти с устойчивыми рабочими характеристиками [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://geektimes.ru/company/icover/blog/263240/>
11. Пшекоп В. Ю. Дискретные ортогональные функции на основе полиномов Эрмита [Текст] / В. Ю. Пшекоп, В. М. Зуев, Н. Н. Свиридова // Проблемы искусственного интеллекта. – Донецк : ГУ «ИПИИ». – 2016. – № 2(3). – С. 66–72.

References

1. *Istoriya razvitiya flesh-pamyati* [The history of flash memory] [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://se7en.ws/istoriya-razvitiya-flesh-pamyati/>
2. *Istoriya flesh nakopiteley* [History of flash drives] [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.entar.com.ua/ru/statji/istoriya-flesh-nakopitelej.html>
3. *Energonezavisimaya osnovnaya pamyat' stanovitsya real'nost'yu* [Non-volatile main memory becomes reality] [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa : <http://citforum.ru/computer/2013-08/>
4. Guk M. YU. *Apparatnyye sredstva IBMRS. Entsiklopediya* [Hardware IBMRS. Encyclopedia]. Z-ye izd. SPb.:Piter, 2006. 1072 s.: il. ISBN 5-469-01182-85.
5. *Perspektivnyye tekhnologii proizvodstva pamyati. Sovremennoye sostoyaniye* [Promising memory technology. Current state] [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/06_12/stat_78.htm
6. *Energonezavisimaya pamyat' sdelana iz togo, sego i yeshche chego-to* [Non-volatile memory is made of this and something else] [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <http://nickhome.ru/scientist/physics/251-energonezavisimaya-pamyat-sdelana-iz-togo-sego-i-esche-chego-to.html>
7. Akira Goda, Krishna Parat Scaling Directions for 2D and 3D NAND Cells. *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*. 2012. Pp. 2.1.1-2.1.4
8. *Zapominayushchiye ustroystva: klassifikatsiya, printsipraboty, osnovnyye kharakteristiki* [Storage devices: classification, principle of operation, main characteristics] [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <http://automationlab.ru/index.php/2014-08-25-13-20-03/435-10>
9. *Vneshniye nakopiteli informatsii: prednaznachenie, raznovidnosti i osnovnyye kharakteristiki* [External storage of information: purpose, types and main characteristics] [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <http://computerologia.ru/vneshnie-nakopiteli-informacii-prednaznachenie-raznovidnosti-i-osnovnye-kharakteristiki/>
10. *Sozdan pervyy opticheskiy chip energonezavisimoy pamyati s ustoychivymi rabochimi kharakteristikami* [Created the first optical chip of non-volatile memory with stable performance] [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://geektimes.ru/company/icover/blog/263240/>
11. Pshekop V. YU., Zuyev V. M., Sviridova N. N. Diskretnyye ortogonal'nyye funktsii na osnove polinomov Ermita [Discrete orthogonal functions based on Hermite polynomials]. *Problemy iskusstvennogo intellekta* [Problems of Artificial Intelligence], Donetsk, GU «IPII», 2016, No 2(3), pp. 66–72.

RESUME

M. V. Blizno

Study of Regularities of Development of the Non-Volatile Memory

Solid-state non-volatile memory has successfully developed since the birth of the computer industry. Manufacturers are constantly working to improve the energy-independent memory, increasing its volume and at the same time reducing the overall dimensions. They invent new technologies, change materials and principles of recording, reading, information processing.

The future development of non-volatile memory suggests the emergence of new, completely different digital storage media. For example, IM Flash Technologies (IMFT) has developed a multi-terabit NAND crystal. The microcircuit is manufactured according to the technological standards of 20 nm and consists of several crystals stacked one above the other. This structure is called "3D-flash memory." She allowed to increase the volume without affecting performance.

Another alternative non-volatile memory can be a fully optical chip developed by scientists from the Karlsruhe Institute of Technology, the universities of Münster, Oxford and Exeter. Such a technology will significantly increase the efficiency and speed of existing systems. The basis of the development is the use of a unique PSM material of the new generation Ge₂Sb₂Te₅ (GST), a chalcogenide compound capable of changing the phase of the crystal lattice from amorphous to crystalline and back under the influence of ultrashort pulsed laser radiation.

In the near future there will be new media. And the devices that we use today will be a relic of the past.

РЕЗЮМЕ

М. В. Близно

Исследование закономерностей развития энергонезависимой памяти

Твердотельная энергонезависимая память успешно развивалась с момента зарождения компьютерной индустрии. Производители ведут постоянную работу над усовершенствованием энергонезависимой памяти, увеличивая её объём и при этом уменьшая габаритные размеры. Изобретают новые технологии, меняют материалы и принципы записи, чтения, обработки информации.

Дальнейшая перспектива развития энергонезависимой памяти предполагает появления новых, совершенно иных цифровых носителей информации. Так, компания *IM Flash Technologies* (IMFT) разработала кристалл NAND емкостью несколько терабит. Микросхема изготавливается по технологическим нормам 20 нм и состоит из нескольких кристаллов, расположенных стопкой друг над другом. Такая структура получила название «3D-флеш-памяти». Она позволила увеличить объём, не повлияв на производительность.

Еще одной альтернативной энергонезависимой памятью может стать полностью оптический чип, разрабатываемый учеными технологического института Карлсруэ, университетов Мюнстера, Оксфорда и Эксетера. Такая технология поможет значительно увеличить эффективность и быстродействие существующих систем. В основе разработок лежит использование уникального PSM-материала нового поколения Ge₂Sb₂Te₅ (GST) – халькогенидного соединения, способного менять фазу кристаллической решетки с аморфной на кристаллическую и обратно под воздействием сверхкороткого импульсного лазерного излучения.

В ближайшем будущем появятся новые носители информации. И те устройства, которые мы сегодня используем, станут пережитком прошлого.

Статья поступила в редакцию 12.02.2019.