

ІСТОРІЯ ТЕХНІКИ

С.Р. Коженевский,
В.В. Вечер

ПОБЕДА ПРОИГРАВШИХ, ИЛИ ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ ФЛЕШ-ПАМЯТИ*

II. Предшественница Flash памяти

Следующим шагом в развитии энергонезависимой памяти стало случайное открытие, сделанное инженером компании Intel Довом Фрохманом в 1971 году. Открытие Фрохмана положило начало новой эры энергонезависимой памяти.

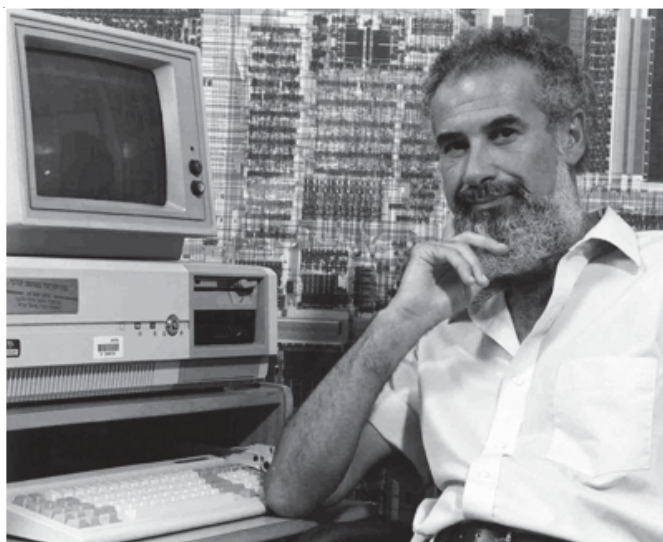


Рис. 5. Дов Фрохман – создатель EPROM памяти

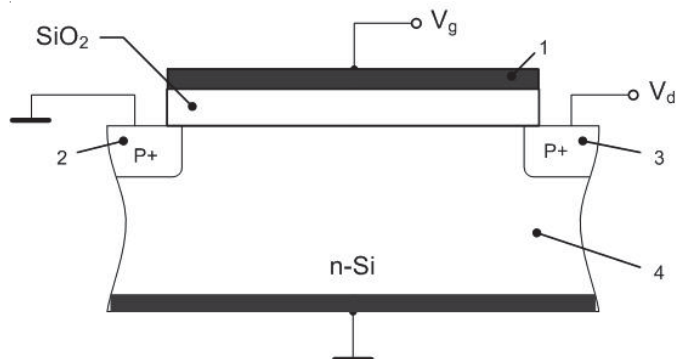
Из воспоминаний Дова Фрохмана: “Прийдя в Intel в 1969 году, я хотел работать над проектом MNOS, но компания Intel еще только создавалась, а в таком случае обычно работать над тем, что тебе нравится – не приходится.

Справка. MNOS (Металл-оксид-нитрид-полупроводник) – альтернативная технология производства полевых транзисторов для интегральных микросхем в конце 1968 года. Впоследствии стала основной для создания твердотельной энергонезависимой памяти.

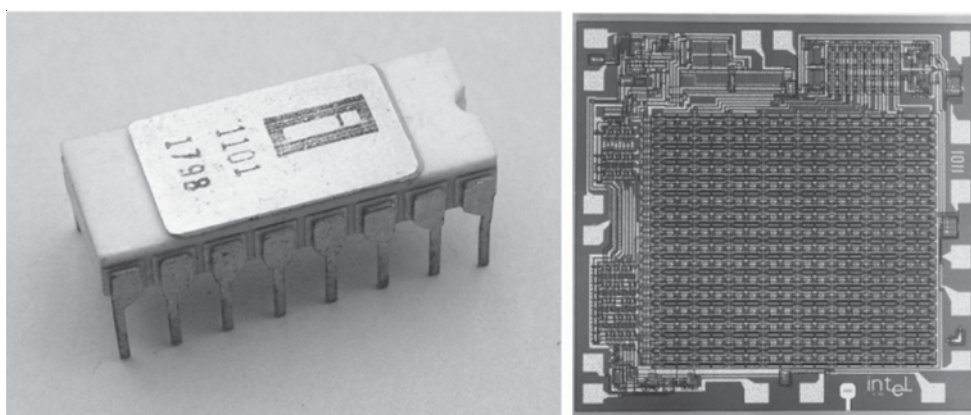
На тот момент в компании разрабатывались только два продукта по старой технологии. Это были чипы: 1101 256-бит NMOS RAM и 3101 64-бит биполярная память.

Справка. NMOS (Металл-оксид-полупроводник с каналом n-типа) – один из видов полевого транзистора, в котором управляющий электрод отделен от канала слоем диэлектрика – оксида кремния;

* Продолжение. Начало в № 3, 2012.



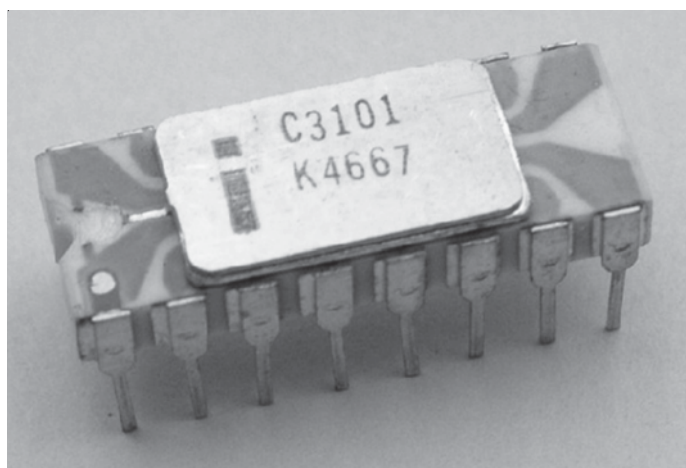
Структурная схема транзистора NMOS. 1 – металлический затвор; 2, 3 – области истока и стока; 4 – кремниевая подложка.



Микросхема Intel 1101 и ее топология

В то время, когда я пришел работать в компанию, остро стоял вопрос о создании нового чипа памяти объемом 1 Кб. Основной задачей было решить, по какой технологии мы будем делать этот чип, должен он быть гибридным (флип чип) или же монокристалльным.

Справка. Флип чип (Flip Chip) – одна из технологий производства гибридных микросхем, при которой в одном корпусе размещается парное количество одинаковых устройств, которые соединены параллельно.

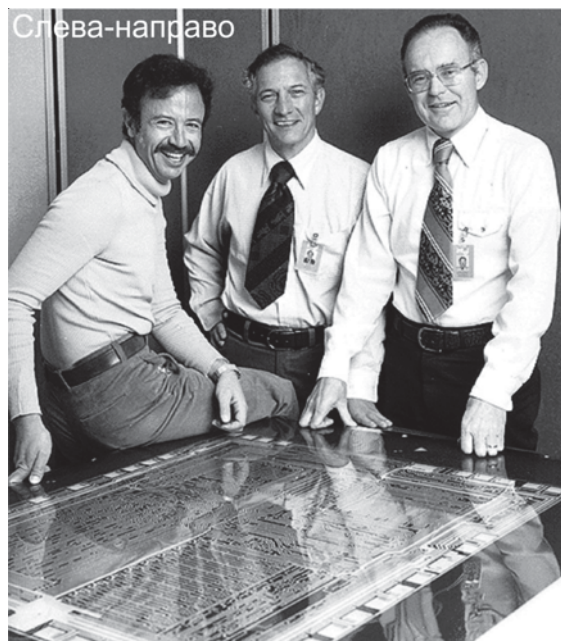


Микросхема памяти Intel 3101

Было предложено два варианта создания этого чипа, первый – объединить четыре 256-битные микросхемы с уже разработанной топологией в одну, то есть сделать гибридную микросхему, или же разработать новый вариант топологии монолитной микросхемы объемом 1 Кб. Руководство компании Intel решило меня и Тома Иннеса, из департамента разработки биполярных устройств, поставить на разработку флип чипов по гибридной технологии.

На тот момент я ничего не знал о технологии флип чипов. Мы работали два месяца, после чего была создана интегральная микросхема, которая состояла из 4 микросхем памяти NMOS по 256-бит. После всех тестов и исследований новой интегральной микросхемы, мы попали на встречу к руководству. На встрече с руководством Intel нами был задан вопрос: “Хорошо, мы имеем рабочий прототип гибридной микросхемы, но хотелось бы знать, по какому пути мы будем двигаться дальше?” На нашей встрече были Гордон Мур, Энди Гроув, и скорее всего был тоже и Роберт Нойс.

Справка. Гордон Мур, Роберт Нойс – бывшие работники компании Fairchild, основатели компании Intel; Энди Гроув – присоединился к коллегам по Fairchild из стал третьим сотрудником компании INTEL. Благодаря Энди Гроуву за 30 лет деятельности компании ее доход вырос с 2672\$ до 20,7 млрд. долларов.



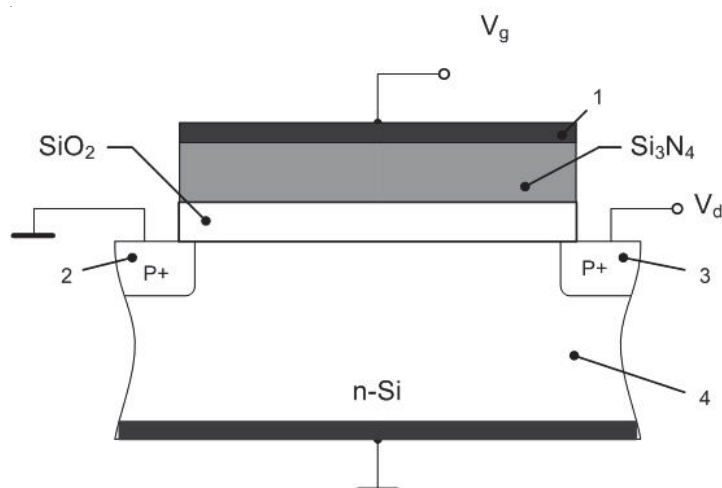
Энди Гроув Роберт Нойс Гордон Мур

Мы были очень счастливы и горды; знаете, молодые инженеры своими руками смогли сделать первый “флип” чип. После некоторого обсуждения между Гордоном и Энди, Гордон сказал: “Парни, вы проделали хорошую работу, но мы будем двигаться дальше по пути создания монолитной микросхемы”. Поскольку у меня не было других срочных проектов, работу над этим чипом поручили также мне.

Разработка монолитной микросхемы имела свои проблемы. После создания тестового шаблона топологии будущей микросхемы, необходимо было передать его на технологическую линию в производство. Проблема заключалась в том, что на тот момент мы имели только две линии производства: кремниевых МОП-транзисторов и биполярных транзисторов. На нашем оборудовании в то время создавать транзисторы по технологии MNOS практически было невозможно.

Девять из десяти микросхем имели дефекты. Через месяц работы я был просто в отчаянии, но продолжал делать работу — создавать эту микросхему.

Справка. На рисунке приведена конструкция MNOS-транзистора (металл — нитрид кремния (Si_3N_4) — оксид кремния (SiO_2) — полупроводник). При наличии заряда в нитриде кремния, открытие транзистора невозможно. На этом принципе базируется использование MNOS-транзистора как элемента памяти.



Конструкция MNOS-транзистора. 1 — металлический затвор; 2, 3 — области истока и стока соответственно; 4 — кремниевая подложка.

Примерно через три месяца после начала моих работ возникли проблемы с нашей основной продукцией, а именно с 256-битной памятью INTEL 1101 NMOS RAM. Мы не смогли продать партию этой продукции, поскольку рабочие параметры микросхем были нестабильны. Проводя тестирование микросхем при температуре 85°C и влажности 85 %, рабочие параметры их “плыли” и теряли стабильность. Примерно в это же самое время мне позвонил руководитель: “Ладно, хватит валять дурака с этим MNOS, вот реальная проблема — выяснить, почему чипы INTEL 1101 теряют надежность, и самое главное для нас — найти решение, как это исправить”. Конечно же, я сразу приступил к исполнению этого задания.

Оказалась, что проблема заключалась в используемом 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.

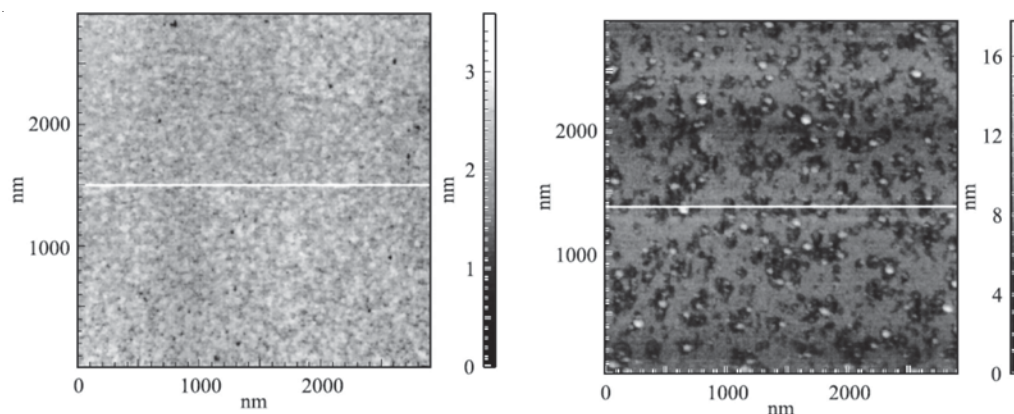


Рис 6. Современные топографические изображения поверхности монокристалла оксида кремния, полученные при помощи атомно-силовой микроскопии. Слева оксид кремния, не имеющий дефекты; справа — с дефектными участками (примеси металла).

При нормальных условиях тестирования микросхемы все параметры оставались в норме, но при повышении влажности, диэлектрик получал свойства полупроводника, и влиял на стабильность работы микросхемы. Поняв в чем дело, решение пришло само собой — нужен был жесткий контроль условий осаждения диэлектрика. Через несколько недель мое предложение было внедрено на производстве.

Сложно вспомнить, когда именно, но это было после завершения работ по расследованию проблем с дефектами, связанными с памятью INTEL 1101, мне пришла идея использовать это явление. Суть его заключалась в следующем. Когда я исследовал диэлектрик, мной было замечено, что примеси металла, которые находились в диэлектрике, могли сохранять заряд. Хорошо зная технологию MNOS, я приступил к разработке и исследованию первого транзистора с двойным затвором. Позднее второй затвор получил название — “плавающий затвор”, поскольку он был виртуальным. Используя технологию MNOS путем осаждения нитрида кремния (Si_3N_4), я создавал область в транзисторе, которая не имела соединения с другими областями (изолированную область) — это и был плавающий затвор. Причем слой оксида между всеми областями получаемого транзистора имел одинаковую толщину и создавался по одинаковой технологии. Основная цель, которую я преследовал при разработке — это получить устройство, которое будет иметь высокую надежность. Вдруг мы поняли, что можем создать устройство хранения информации. Хотя нитрид кремния (Si_3N_4) имеет лучшие диэлектрические свойства, по сравнению с оксидом кремния (SiO_2), мы выбрали последний. Причиной такого перехода послужило именно то, что на тот момент технология MNOS, которая использовала нитрид кремния, имела проблемы при производстве (те же проблемы, с которыми я столкнулся при работе с монолитной микросхемой памяти). Структурная схема транзистора, предложенная Фрохманом, представлена на рис 7.

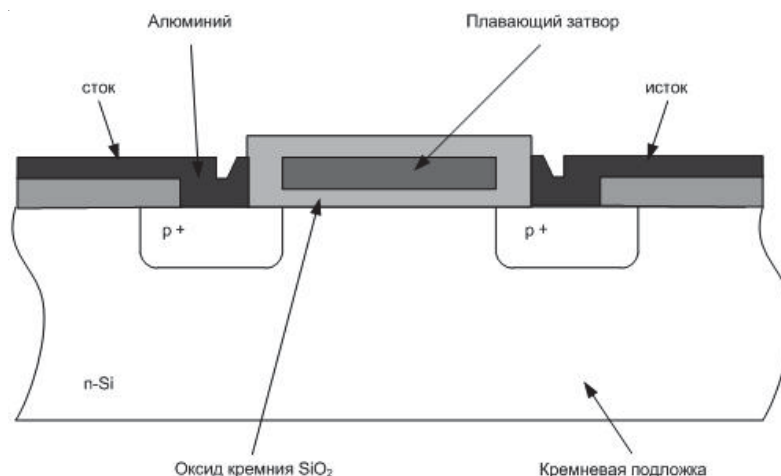


Рис 7. Структура транзистора для хранения информации, предложенная Фрохманом

Главной нашей целью было ничего не изменять в процессе производства, и решить проблему как разместить электроны на плавающем затворе. Изначально мы отказались от идеи туннелирования электронов в пользу лавинной инжекции (инжекция горячих электронов).

Справка. Туннельный эффект, туннелирование – квантовый эффект, состоящий в проникновении квантовой частицы сквозь область пространства, в которой согласно законам классической физики нахождение частицы запрещено. Инжекция горячих электронов – процесс перехода заряженных частиц через энергетический барьер, образованный тонким диэлектриком, за счет увеличения их кинетической энергии в канале между истоком и стоком в ячейке.

Эта идея пришла нам в ходе работ по надежности, так как процесс тунелирования очень быстро “изнашивал” слой диэлектрика. Именно тогда я стал думать над этим вопросом. Первое, что пришло в голову – это лавинный пробой, но, понятное дело, подвергать чип объемом 2 Кб при записи лавинному пробую – идея не из лучших. Поэтому пришла идея применить канал сток-исток для обеспечения лавинной инжекции электронов и приданию заряда плавающему затвору. Таким образом, была решена проблема программирования будущей ячейки памяти и достигнута высокая надежность хранения данных.

Справка. Первые транзисторы с плавающим затвором создавались на основе р-канальной технологии (основными носителями заряда при р-канальной технологии являются дырки). Подложкой служит пластина кремния n-типа (основными носителями заряда являются электроны) с удельным сопротивлением 4...8 Ом x см.

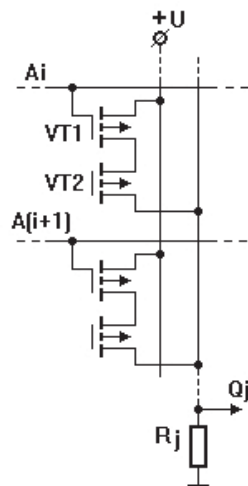
Механизм заряда плавающего затвора основан на следующих эффектах. На область стока р-канального МДП-транзистора (сток) подается отрицательный потенциал. По мере увеличения отрицательного смещения обедненный слой и электрическое поле в нем растет. Под действием электрического поля в обедненном слое неосновные носители (электроны) из стоковой р+-области будут дрейфовать в n-область подложки. С увеличением напряженности поля возрастает дрейфовая скорость электронов и при определенном критическом значении напряженности поля возникает лавинный процес. Одновременно за счет емкостной связи на плавающем затворе индуцируется положительный заряд, который формирует электрическое поле, направленное от плавающего затвора к стоку.

Таким образом, электрическое поле обратносмещенного стокового р-n-перехода формирует значительное количество высокоэнергетических (горячих) электронов, обладающих достаточным запасом энергии, чтобы преодолеть потенциальный барьер тонкого слоя диэлектрика, находящегося под плавающим затвором. Преодолев его, “горячие электроны” стекают на плавающий затвор, так как на нем за счет емкостной связи присутствует притягивающее их положительное напряжение смещения. По мере зарядки плавающего затвора на нем аккумулируется отрицательный заряд, который будет создавать поле, препятствующее процессу заряда. При этом ток лавинной инжекции через диэлектрик будет уменьшаться и при определенной величине заряда на плавающем затворе уменьшится до нуля.

После зарядки плавающего затвора электронами, транзистор переходит в открытое состояние, т.е. хранит логический “0”.

Принцип работы устройства был следующим. Для записи информации в ячейки, необходимо было выбрать нужный адрес, и подать высокое напряжение на транзисторы. Это создавало лавинный процесс движения электронов в канале сток-исток. При этом электроны получают достаточно энергии, чтобы пройти изолирующий слой диэлектрика и аккумулироваться на плавающем затворе. Когда напряжение снимается, электроны оказываются запертыми на затворе. Таким образом мы смогли запрограммировать микросхему памяти.

Справка. Чтение данных из такой памяти осуществлялось следующим образом. Выбор необходимой строки в данном устройстве осуществляется подачей сигнала логического нуля на соответствующую строку. При этом логический “0” подается на строку A_i и открывает плавающий затвор транзистора VT1. Если плавающий затвор транзистора VT2 имеет отрицательный заряд, то в этом случае открывается и транзистор VT2, и протекающий ток создаст на резисторе R_j напряжение логической единицы. Если же на плавающем затворе транзистора VT2 нет заряда, то транзистор – закрыт, а на резисторе R_j присутствует напряжение логического “0”.



Схема, объясняющая принцип чтения данных с ячейки памяти, предложенной Фрохманом

Следующей проблемой стало стирание информации из ячеек памяти. Первой идеей по стиранию информации из ячеек памяти, которая пришла мне в голову, было использование для этой цели рентгеновских лучей. Все банально просто, вы имеете электроны, которые находятся на плавающем затворе. С помощью рентгеновского излучения вы придаете им энергию и они переходят обратно в подложку, тем самым освобождая плавающий затвор. Эта идея не прижилась, по причинам ее простоты, и одновременно по причине разрушения кремния рентгеновским излучением. Тогда я сказал себе: “Рентгеновское излучение недопустимо применять для процесса стирания, мы должны идти к чему-то, что не разрушает микросхему”. Я начал работать над применением ультрафиолетового света для стирания информации. Этот процесс был для меня новым “взрывом мозга”. Я имею ввиду, что нам надо было получить некоторое излучение, чтобы передать электронам энергию и достичь эффекта разряда плавающего затвора. Ультрафиолетовое излучение не разрушало кремневую подложку, и процесс стирания происходил достаточно быстро и очень хорошо, но для стирания информации необходимо было иметь в микросхеме кварцевое окно, чтобы пропускать через него ультрафиолетовый свет к ячейкам памяти.

В то время, когда я пришел к этому, я снова вспомнил, что наша компания была только создана, и представлял себе, как отреагирует производство на мое творение и главное на то, что микросхема должна иметь на корпусе кварцевое окно. Мои предположения недалеко ушли от реакции на такую конструкцию специалистов на производстве. Спасло мой проект только то, что Роберт Нойс был прекрасным руководителем, который всегда шел навстречу инженерам, предлагающим инновации. Моя встреча с ним произошла в кабинете фирмы с видом на горы, и первый вопрос который задал мне Нойс звучал так: “Дов, чем вы озабочены в это прекрасное утро? В чем дело?”. На что я показал ему свое устройство и объяснил, как мы можем запрограммировать его, а затем рассказал о методах стирания. Также я показал, что стирание ультрафиолетовым светом — это наш лучший вариант, но производство не возьмется за этот проект, так как для стирания необходимо разместить в корпусе микросхемы кварцевое окно.

Реакция Нойса, была для меня ошеломляющей: “Так в чем дело? У нас есть соглашение, по которому запрещается размещать кварцевое окно на корпусе

микросхемы? Нет?” Этой фразой Нойс открыл новое направление в создании EPROM (Erasable Programmable Read Only Memory) памяти.

Справка. Новый тип транзистора Фрохман назвал FAMOS (Floating gate Avalanche injection Metal Oxide Semiconductor) – полевой МОП-транзистор с лавинной инжекцией заряда.

Примерно через месяц напряженной работы были созданы первые тестовые образцы. К сожалению, для истории не сохранились не только образцы, но и фотографии этих микросхем, которые были представлены руководству INTEL. Что-бы вы понимали, первая микросхема EPROM памяти имела размеры порядка 6 см², а вместо кварцевого окна была размещена металлическая трубка, на конце которой было размещалось кварцевое окно с колпачком (для закрытия отверстия от попадания света). На очередной встрече с руководством мы представили эту микросхему. Я показал, как микросхему можно программировать, а затем стирать при помощи ультрафиолетового света. Все присутствующие были под впечатлением, но старались скрыть свои эмоции, и порой мне казалось, что они смотрят на мою работу скептически. Последнее слово было за Гордоном, он помолчал секунд тридцать, а затем к всеобщему удивлению сказал: “Давайте сделаем это!”

Так появилась первая микросхема EPROM памяти, общим объемом 2048 байт и ей было присвоено наименование Intel 1702. Запись одного бита информации занимала порядка 25 миллисекунд, а перезапись всего объема памяти микросхемы порядка 50 секунд. Впервые мы показали эту микросхему на конференции ISSCC (International Solid-State Circuits Conference – международной конференции разработчиков твердотельной электроники) в 1971 году. Это был “звездный” дебют как мой, так и моего продукта. Причиной этого стало то, что мы никого не предупредили заранее о том, что мы будем представлять. Такой подход вызвал сразу огромный интерес к нашей разработке и этим позволил сделать хороший маркетинговый ход для развития компании Intel.

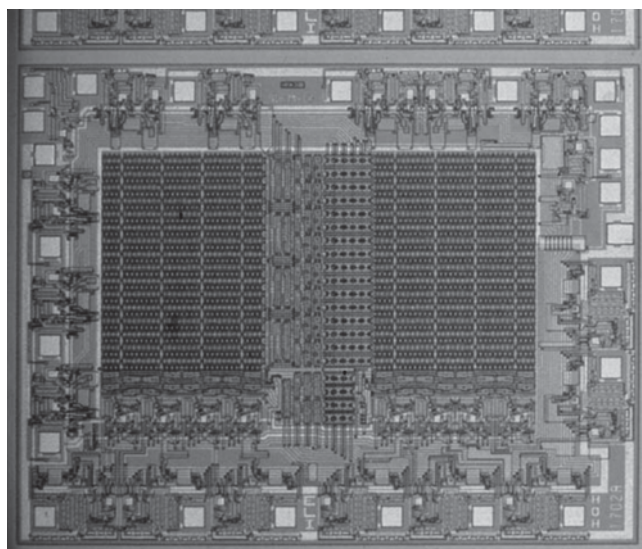


Рис. 8. Топология микросхемы INTEL 1702.
Физическая занимаемая площадь 3,73х4,08 мм.

Еще одним нашим маркетинговым ходом была заявка о том, что записанная на микросхему информация может храниться 10 лет. Теперь я могу это рассказать, но на момент производства этих микросхем и до начала 80-х годов у нас не было никаких научных доказательств этого и тем более научных исследований о том, что

інформація може хранитися в пам'яті EPROM 10 лет. Только в 80-х годах мы убедились, что информация в этих микросхемах может храниться более 10 лет. Этот результат был получен путем анализа рынка продаж нашего продукта. Посудите сами, кто покупал бы ненадежную продукцию. Мы испытывали нашу микросхему в разных ситуациях, помещали ее на крышу под яркий солнечный свет, освещали ее ультрафиолетовым светом, пропускали свет через дифракционные и интерференционные решетки. В то время мы давали гарантию хранения 10 лет, сами не зная, будет ли действительно так долго храниться заряд на плавающем затворе”.

Несмотря на появление новых технологий в производстве твердотельной энергонезависимой памяти, и в частности появления Flash памяти, изобретенной Фудзиро Масуока, EPROM память до сих пор находит применение как в промышленных, так и в различных бытовых устройствах.

Микросхемы EPROM памяти сразу же получили стремительное развитие. Их производство было освоено не только в США, но и в других странах.



Рис. Микросхемы EPROM памяти производства разных стран

В СССР, например, микросхемы EPROM памяти выпускались в Новосибирске, на базе НПП «ВОСТОК». Это предприятие в начале 70-х годов прошлого столетия разрабатывало и производило радиолампы военного назначения и было перестроено на производство твердотельных электронных компонентов, начиная с транзисторов и заканчивая большими интегральными микросхемами. Первой микросхемой EPROM памяти СССР стала микросхема серии 573-К573РФ1. Она имела объем 8 Кбит (1024x8) и содержала 17986 интегральных элементов. Характеристики микросхем EPROM памяти, которые выпускались в СССР, представлены в таблице.

Таблица

Тип микросхемы	Информационный объем	Организация, слов х разрядов	Время выборки адреса, мс
К573РФ1	1К	1Кx8	450
К573РФ2	16К	2Кx8	450
К573РФ3	64К	4Кx16	450
К573РФ4	64К	8Кx8	500
К573РФ5	16К	2Кx8	450
К573РФ6	64К	8Кx8	500
К573РФ23/24	16К	2Кx8	450
К573РФ31/32	32К	2Кx16	450

Ети мікросхеми широко застосовувалися в перших мікрокомп'ютерах і персональних комп'ютерах виробництва СРСР. Так, наприклад, мікросхему серії К573 можна побачити на платі одного з перших аматорських персональних комп'ютерів Радио-86РК.

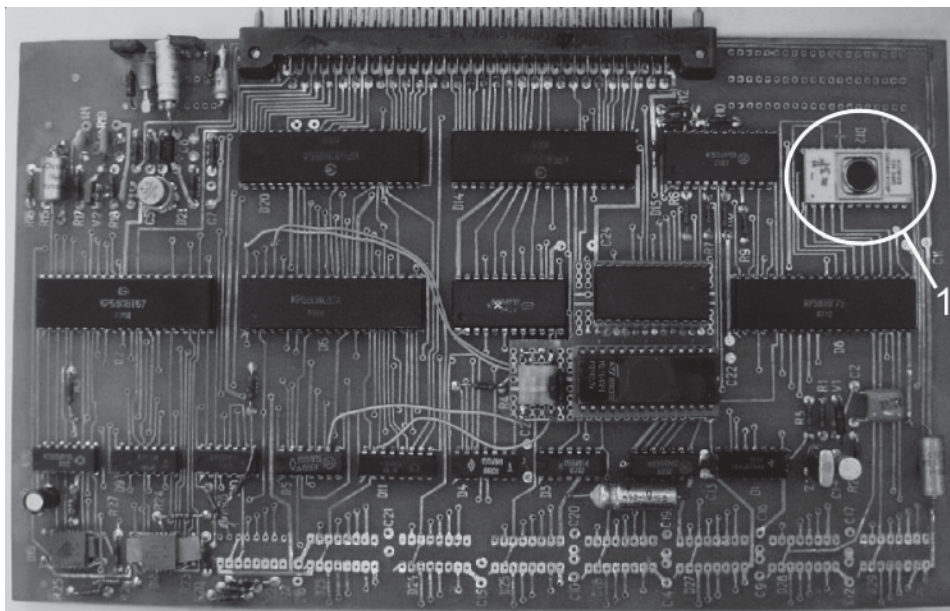


Рис. 10. Плата Радио-86РК без ОЗУ: 1– мікросхема К573РФ2 (музей комп'ютерної техніки ООО «ЕПОС»)

Для програмування мікросхем пам'яті EPROM застосовувалися спеціальні пристрої – програматори.

Справка. Програматор – апаратно-програмне пристрій, призначений для запису/читання інформації в постійне запам'ятовуюче пристрій (ПЗУ, ROM).

Програматори EPROM пам'яті поділялися на автономні і універсальні.

Незалежно від використаного типу програматора для запису інформації в ПЗУ, програмування зводиться до подачі на виводи мікросхем послідовності логічних сигналів і програмувальних імпульсів. Цикл запису ячейки пам'яті зазвичай складається з вибору адреси ячейки і підготовки мікросхеми до програмування, потім слід процес занесення інформації в вибрану ячейку і відновлення робочого стану ПЗУ. За циклом запису інформації часто слід перевірка її коректності, в залежності від результатів якої, приймається рішення про подальші дії. Випускаються промисловістю програматори, призначені для автономного застосування, дозволяли програмувати мікросхеми PROM і EPROM в поетапному і автоматичному режимах, з контролем запису і попереднім редагуванням вносимої в мікросхему інформації. Характерною особливістю їх було застосування клавіатури або комутаційної панелі для набору програмного коду. На рис. 11 Показаний один з таких автономних програматорів.



Рис 11. Автономный прибор программирования и отладки МВ 96.03
(музей компьютерной техники ООО “ЕПОС”)

Отдельным классом автономных программаторов являлись микропроцессорные лаборатории. Они применялись как для обучения специалистов программированию микроконтроллеров, так и для отладки программного кода и записи информации в микросхемы ПЗУ. Большинство таких программаторов строилось на основе микропроцессорных наборов КР580ИК. Устройство позволяло производить работу с PROM и EPROM микросхемами памяти. Поэтому большинство специалистов с целью экономии денег использовали EPROM память только для отладки программного кода устройства. Причиной такого подхода была высокая цена и недоступность микросхем EPROM памяти. На рис. 12 приведена одна из таких микропроцессорных лабораторий.



Рис.12. Автономная микропроцессорная лаборатория – Микролаб К580ИК80
(музей компьютерной техники ООО “ЕПОС”)

Для программирования различных микросхем ПЗУ в промышленных масштабах, необходим специальный универсальный программатор, позволяющий заносить информацию как минимум во все популярные типы БИС. Такой программатор должен обладать функциональной избыточностью (для работы с новыми типами ПЗУ), и иметь широкие сервисные возможности – копирования, редактирования и распечатки содержимого в различных форматах, сравнения и преобразования программных кодов. Этим требованиям мог удовлетворить только программатор со “встроенным интеллектом”, который по набору устройств ввода-вывода и выполняемым функциям сравним только с микроЭВМ. Здесь нет противоречий – универсальные программаторы практически всегда являются периферийным устройством для ЭВМ. ЭВМ в этом случае обеспечивает для пользователя хорошую программную поддержку, предоставляя свои ресурсы программатору.

В 80–90-х годах прошлого столетия для радиолюбителя покупка промышленного программатора была невозможна. Поэтому большинство радиолюбителей собирали программаторы собственными силами. Очень часто описание схем универсальных программаторов становилось достоянием общественности, благодаря журналу “Радио”. На рис. 13 приведена конструкция одного из таких радиолюбительских универсальных программаторов.

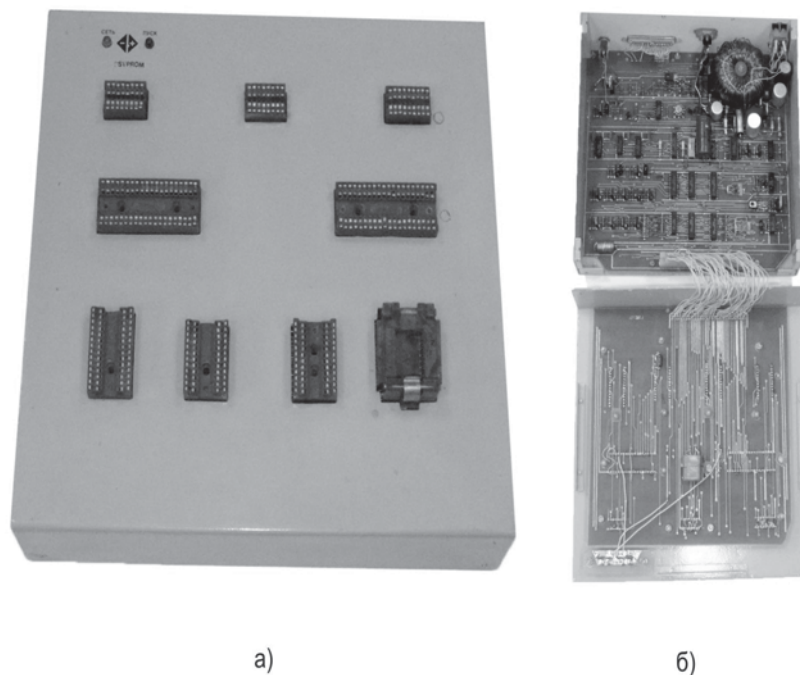


Рис. 13. Радиолюбительский программатор ПЗУ: а) – общий вид; б) – вид программатора внутри (музей компьютерной техники ООО “ЕПОС”)

Стирание данных с EPROM памяти производилось при помощи различных ультрафиолетовых лампам. Промышленностью выпускались специализированные устройства для стирания информации из ячеек памяти EPROM. На рис. 14 показано одно из таких устройств.



Рис 14. Прибор ультрафиолетового стирания данных из EPROM. Используется в работе сервисного центра ООО “ЕПОС”

Чаще всего радиолюбители (с целью экономии денег) сами собирали такие устройства с ультрафиолетовым излучением. Для этой цели использовались элементы из конструкции ламп уличного освещения или же медицинские лампы ультрафиолетового излучения*.

* Окончание в следующем номере.