

М.И. Баранов

**АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 42:  
ЭЛЕКТРОНИКА: РЕТРОСПЕКТИВА, УСПЕХИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ РАЗВИТИЯ**

*Наведено науково-технічний огляд про ретроспективу, успіхи, тенденції і перспективи розвитку світової електроніки. Розглянуті основні етапи розвитку електроніки, що пов'язані з винаходом радіолампи, транзистора, інтегральної схеми і високоінтегрованого мікропроцесора. Відмічений внесок електронних компаній «Кремнієвої долини» США в технологічний прорив в мікроелектроніці. Описаний стан робіт в галузі вакуумної мікроелектроніки і наноелектроніки. Бібл. 34, рис. 22.*

*Ключові слова:* вакуумна електроніка, радіолампа, твердотільна мікроелектроніка, транзистор, інтегральна схема, мікропроцесор, вакуумна інтегральна схема, вакуумна мікроелектроніка і наноелектроніка, тенденції і перспективи розвитку електроніки.

*Приведен научно-технический обзор о ретроспективе, успехах, тенденциях и перспективах развития мировой электроники. Рассмотрены основные этапы развития электроники, связанные с изобретением радиолампы, транзистора, интегральной схемы и высокоинтегрированного микропроцессора. Отмечен вклад электронных компаний «Кремниевой долины» США в технологический прорыв в микроэлектронике. Описано состояние работ в области вакуумной микроэлектроники и нанoeлектроники. Библ. 34, рис. 22.*

*Ключевые слова:* вакуумная электроника, радиолампа, твердотельная микроэлектроника, транзистор, интегральная схема, микропроцессор, вакуумная интегральная схема, вакуумная микроэлектроника и нанoeлектроника, тенденции и перспективы развития электроники.

**Введение.** Для человечества в 20-ом столетии наступило то время, когда дальнейшее развитие научно-технического прогресса в обществе стало немыслимо без электроники. Как известно, под «электроникой» понимается та область науки и техники, которая охватывает изучение и практическое использование электронных и ионных явлений, протекающих в вакууме, газах, жидкостях, твердых телах и плазме, а также на их границах [1]. Вот поэтому электроника занимается исследованием взаимодействия электронов и ионов с электромагнитными полями и методами создания электронных приборов для преобразования электромагнитной энергии в основном для передачи, приема, обработки и хранения информации [2]. Электроника стала основой современной автоматизации, радиотехники, электротехники, энергетики, кибернетики, информационных технологий и других важных научно-технических областей знаний. Без электроники стали невозможны исследования на высоком научном уровне как в области микромира (например, клеток растительного и животного происхождения, атомов и молекул вещества), так и макромира (например, объектов природы планеты Земля, тайн ближнего и дальнего космоса). Без широкого использования электроники не обходятся при разработке и создании большинства сложных объектов военного и гражданского назначения (например, самолетов, ракетно-космической техники, электростанций, аудио-, теле-, и видеотехники и др.). Электронике и ее успехам во всех промышленно развитых странах мира уделяется повышенное внимание. По уровню развития в стране электроники и соответственно электронной промышленности эксперты делают мотивированную оценку ее научно-технического потенциала и экономических возможностей в средне- и долгосрочной перспективе [2]. Возникновению электроники предшествовало изобретение в конце 19-го века (7 мая 1895 г.) нашим бывшим соотечественником, профессором кафедры физики Петербургского электротехнического института А.С. Поповым (1859-1906 гг.) беспроволочной

радиосвязи [2, 3]. Укажем, что значительному развитию в мире радиосвязи способствовали выдающиеся достижения талантливого итальянского инженера и бизнесмена Г. Маркони (1874-1937 гг.), отмеченные в 1909 г. Нобелевской премией по физике [4]. Радио и радиопередатчики сразу же нашли применение в военном деле и в первую очередь на флоте [2, 3]. Именно тогда для практической реализации актуальных прикладных радиотехнических задач и потребовалась соответствующая элементная база, изучением и созданием которой предметно и занялась электроника.

**Целью статьи** является составление на основе опубликованных в открытой печати материалов краткого научно-технического обзора об истоках, основных этапах, достижениях, современных тенденциях и перспективах развития в мире электроники.

**1. Этап зарождения электроники и изобретение радиолампы.** Создание и развитие в мире элементной базы электроники фактически началось с изобретения в начале 20-го века электронной лампы (ЭЛ). Так, в 1904 г. Джоном Флемингом был получен британский патент на «Прибор для преобразования переменного тока в постоянный» [2, 5]. Именно этот двухэлектродный вакуумный прибор – диод и послужил открытием на Земле века электроники. Поэтому данную электронику принято называть «вакуумной электроникой» [5]. ЭЛ или просто радиолампа, как известно, представляет собой электровакуумный прибор, работающий за счет управления интенсивностью потока свободных электронов, движущихся внутри отвакуумированного герметичного стеклянного баллона между металлическими электродами. Указанные электроны в ЭЛ возникают из-за явления их термоэлектронной эмиссии с поверхности металлического катода, разогретого постоянным (переменным) током накала до высокой температуры (около (800-3000) °С) [2, 5]. Следует заметить, что автором открытия явления термоэлектронной эмиссии с раскаленного электрода считается знаменитый американский электро-

© М.И. Баранов

техник и изобретатель Томас Эдисон (1847–1931 гг.), который в 1883 г. в опытных исследованиях по возможности увеличения срока службы осветительной лампы, содержащей угольную нить накаливания в откакумированной стеклянной колбе, зафиксировал прохождение электрического тока в вакууме от накаленной нити лампы к плоскому металлическому электроду, расположенному вблизи данной нити [5]. Тогда важности значения этого вроде бы локального электрофизического явления, но как оказалось в будущем фундаментального научного открытия, он до конца и не понял. Но как опытный изобретатель, на всякий случай, он все же запатентовал его в США. Со временем именно это открытие стало основой работы всех типов ЭЛ и, по сути, основой для всей вакуумной электроники вплоть до создания полупроводниковых приборов. Дж. Флеминг использовал указанный «эффект Эдисона» при создании своего электровакуумного диода, сыгравшего видную роль в истории радиотехники. Основным недостатком «диода Флеминга» была его невозможность усиливать электрические сигналы. В 1906 г. американский инженер Ли де Форест ввел в ЭЛ третий электрод в виде управляющей металлической сетки и изобрел таким путем электровакуумный триод, показанный ниже на рис. 1 [5, 6].



Рис. 1. Общий вид триода, созданного Ли де Форестом [5, 6]

«Триод Фореста» стал первой усилительной лампой и основой для дальнейшего совершенствования ЭЛ с подогреваемым катодом [7]. Эта ЭЛ за счет подачи на ее управляющий электрод переменного электрического потенциала могла работать в качестве усилителя электромагнитных колебаний [7]. В 1913 г. на основе «триода Фореста» был создан первый автогенератор [5, 7]. Большой вклад в эти пионерские разработки для потребностей радиотехники с применением лампового триода в целях генерирования электромагнитных колебаний был внесен А. Мейснером [8]. ЭЛ и созданные на их основе ламповые усилители стали активно использоваться на радиостанциях. Под руководством известного российского радиотехника М.А. Бонч-Бруевича (1888–1940 гг.) в Нижегородской радиолaborатории в 1919 г. была создана первая российская радиолампа, получившая название «Бабушка» (рис. 2) [9]. В дальнейшем за ламповыми диодом и триодом были созданы такие типы ЭЛ как [7]: тетроды (1913 г.), пентоды (1929 г., рис. 3), гексоды (1932 г.), гептоды, октоды и ноноды. Эти типы ЭЛ отличаются по конструкции друг от друга, прежде всего, числом металлических сеток (от двух до семи) [5, 7]. ЭЛ, использующие внутри катода нить накала, называются лампами косвенного накала, а ЭЛ, выполненные с нитью накала в виде самого катода, получили название ламп прямого накала. Катоды ЭЛ, как правило, активируют металлами, имеющими малую работу выхода

электронов. В ЭЛ прямого накала для этих целей используют радиоактивный торий, а в лампах косвенного накала – барий [7]. На внутренней поверхности стекла ЭЛ можно видеть блестящее покрытие-геттер, предназначенное для адсорбции остаточных газов в ее внутреннем откакумированном объеме и индикации в нем вакуума (при попадании воздуха внутрь ЭЛ геттер белеет [7]). Пик «расцвета» в мире вакуумной электроники пришелся на 1930–1950 гг.



Рис. 2. Общий вид первой российской мощной радиолампы «Бабушка» (Нижегородская радиолaborатория, 1919 г.) [9]

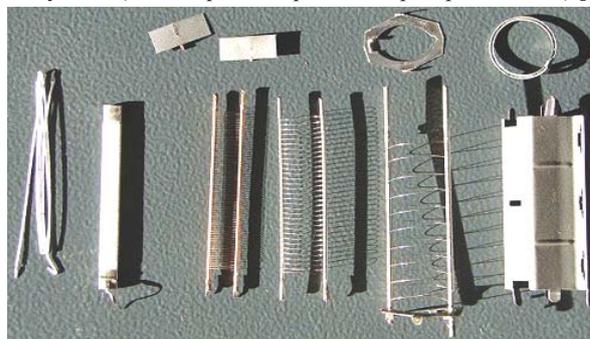


Рис. 3. Внешний вид отдельных элементов современного электровакуумного пентода (слева направо: нить накала; подогреваемый катод; три металлических сетки; анод; верху указанных элементов ЭЛ – детали их крепления) [7]

Укажем, что в 1913 г. Г. Маркони запатентовал конструкцию анода радиолампы в виде полого металлического цилиндра различной конфигурации, окружающего снаружи внутренний коаксиально расположенный ему катод [7]. В этой связи ЭЛ уже в 1930-х годах практически приобрела тот внешний вид, который она имеет сейчас (рис. 4). В мощных радиолампах с большой плотностью тока катода чисто металлические катоды выполняют их тугоплавкого вольфрама. Аноды в таких ЭЛ чаще всего изготавливают в форме коробочки (см. рис. 3, 4), окружающей катод и сетки, из никеля или молибдена (иногда из тантала) [7]. Сетка в ЭЛ представляет собой решетку (см. рис. 2) или спираль из тонкой тугоплавкой металлической проволоочки, навитой вокруг катода. Незначительное изменение разности электрических потенциалов между управляющей сеткой и катодом приводит к большим изменениям анодного тока во внешней цепи ЭЛ.

Остановимся далее на достоинствах и недостатках ламповых электронных усилителей, использующих в своих схемах радиолампы. К основным достоинствам усилителей на ЭЛ следует отнести [6, 7]:

- простоту схем (в ламповых усилителях по сравнению с полупроводниковыми усилителями на поря-

док меньше составных элементов и деталей; ЭЛ обеспечивают большее усиление, чем транзисторы);

- высокую надежность в работе (выходные параметры ЭЛ мало зависят от таких внешних воздействующих факторов как температура, давление, оптические и ионизирующие излучения; ЭЛ малочувствительны к электрическим перегрузкам в их цепях);
- хорошую согласуемость с нагрузкой (ламповые каскады имеют большое входное сопротивление, что способствует уменьшению числа активных элементов в усилителе и снижению на них потерь);
- простоту в обслуживании (при выходе из строя ЭЛ ее гораздо легче заменить, чем транзистор);
- отсутствие на их выходе некоторых видов искажений, присущих транзисторным каскадам.



Рис. 4. Общий вид современной вакуумной радиолампы [7]

К основным недостаткам электронных усилителей на радиолампах можно отнести следующее [6, 7]:

- сравнительно низкий КПД (в используемых ЭЛ помимо электропитания анода требуется за счет нити накала осуществлять подогрев катода, что приводит к дополнительным затратам электроэнергии);
- большую инерционность при подготовке к работе (все ЭЛ требуют предварительного прогрева);
- определенные ограничения по технике безопасности при их эксплуатации (электронные схемы с использованием ЭЛ требуют применения в их цепях напряжения, составляющего сотни и тысячи вольт);
- ограниченный срок службы (со временем катод ЭЛ теряет свои эмиссионные свойства по испусканию свободных электронов; сравнительно высокая вероятность перегорания нити накала катода ЭЛ);
- хрупкость их ЭЛ со стеклянным баллоном.

Несмотря на указанные недостатки, ЭЛ продолжают активно использовать и в настоящее время при создании электронных схем следующей техники [7]:

- мощных радиовещательных передатчиков, имеющих выходную мощность от сотен ватт до нескольких мегаватт (в электронных схемах таких радиоприборов применяются мощные и сверхмощные радиолампы с воздушным или водяным охлаждением и током накала в цепях катодов ЭЛ в 100 А и более);
- объектов военной техники, стойких к поражающему воздействию мощного электромагнитного импульса естественного (от разрядов молнии) и искусственного (от ядерных взрывов) происхождения;
- ракетно-космической техники, подвергающейся при полете в условиях открытого космоса длительному воздействию потоков радиации (радиационная деградация полупроводников ограничивает их применение в электронике космических аппаратов);
- высококачественной звуковой аппаратуры.

Отметим, что введение любого газа в ЭЛ ухудшает ее технические характеристики. Тем не менее, в

радиотехнической практике потребовались газоразрядные приборы, в которых управление их электрическим ионным током осуществляется напряжением, подаваемым на их металлические электроды. Такие ионные приборы получили название «тиратронов», один из представителей которых приведен на рис. 5.



Рис. 5. Общий вид большого водородного тиратрона, используемого в импульсных электроцепях современных радаров (изготовитель – фирма «General Electric», США) [10]

Тиратрон представляет собой герметичный стеклянный баллон, заполненный газом (обычно инертным газом, водородом или парами ртути) и содержащий внутри как минимум три электрода – катод, анод и сетку [10]. Сетка в тиратроне используется для зажигания газового разряда в пространстве между катодом и анодом. Для этой цели на нее от источника питания подается высокое импульсное напряжение. Возникающий из-за данного электрического искрового разряда в замкнутом объеме тиратрона ионизированный газ (плазма) проводит между катодом и анодом электронно-ионный ток. Таким путем в трехэлектродном газоразрядном тиратроне происходит включение и выключение импульсного тока в его анодной цепи. В силовых цепях высоковольтной импульсной техники, использующих мощные емкостные накопители энергии (ЕНЭ) для подачи больших импульсных токов (БИТ) нано- и микросекундного диапазона на электрическую нагрузку, широкое применение нашли трехэлектродные электронные приборы, получившие в электронике название «тригatronов» [11]. Обычно их рабочая камера заполняется газовым диэлектриком (рис. 6). Реже ее заполняют жидким диэлектриком. Тригatronы являются одной из разновидностей управляемого искрового коммутатора [12].

Тригatronы используют холодный катод. На их управляющий (инициирующий) электрод (аналог сетки в тиратроне) от генератора поджигающих электрических сигналов подается микросекундный импульс напряжения амплитудой до  $\pm 100$  кВ, вызывающий появление в локальной зоне одного из его основных электродов искрового разряда и соответственно начальную ионизацию окружающего его плазменный канал газообразного диэлектрика. В результате резкого снижения электрической прочности его основного изоляционного промежутка между катодом и анодом тригatronа происходит электрический пробой рабочей диэлектрической среды и соответственно разряд предварительно заряженного ЕНЭ на нагрузку. Амплитуды коммутируемых тригatronами БИТ состав-

ляют от десятков до тысяч килоампер [11, 12]. Этот вид электронных приборов применяется также в качестве сильноточных высоковольтных коммутаторов в разрядных цепях генераторов высоких и сверхвысоких импульсных напряжений, выполненных по классической схеме Аркадьева-Маркса, в высоковольтных устройствах сильноточных ускорителей заряженных частиц и схемах электродинамических пушек [11, 12].



Рис. 6. Общий вид мощного тригatronа типа CV100 [11]

Удачной комбинацией управляемых искровых коммутаторов – тригatronов и тирatronов стали такие газонаполненные лампы с холодным катодом как «крайтроны» [13]. Крайтроны (рис. 7) характеризуются быстрым включением электрической цепи с целью передачи по ней мощного сигнала с большим током и высоким напряжением. Первые образцы крайтронов были созданы в США фирмой «EG&G Corporation» для передатчиков радаров военных самолетов [13].



Рис. 7. Общий вид крайatronа-ключа марки KN2 «Krytron» (изготовитель – фирма «EG&G Corporation», США) [13]

В отличие от большинства газоразрядных приборов в крайatronах используется электрический дуговой разряд, предназначенный для инициирования сильноточного искрового разряда между катодом и анодом этих газонаполненных ламп. В связи с чем крайтроны имеют четыре электрода: два основных или главных (катод-cathode и анод-anode), управляющую сетку (grid) и электрод предзажигания (keer-alive) [13]. В крайatronе электрод предзажигания, к которому прикладывается небольшое напряжение положительной полярности, расположен рядом с катодом, имеющим отрицательный электрический потенциал. Высокое коммутируемое напряжение в крайatronе подается на анод. После возникновения электрического дугового разряда между электродом пред-

зажигания и катодом и начальной ионизации в этой локальной зоне газа в стеклянном баллоне крайatronа на его управляющую сетку подается положительный импульс напряжения, приводящий к появлению сильноточного электрического искрового разряда между анодом и катодом крайatronа [13]. Электрический пробой изоляционного промежутка между анодом и катодом крайatronа и обеспечивает быструю коммутацию его сильноточной цепи с нагрузкой. Для облегчения ионизации газа крайatronа в его стеклянный баллон помещают изотоп радиоактивного никеля-63, излучающего  $\beta^-$  лучи (электроны) [13]. Крайтроны, созданные во второй половине 1940-х годов, из-за своих стабильно высоких по сравнению с полупроводниковыми приборами импульсных характеристик нашли применение в промышленной пиротехнике и атомной технике (например, в сильноточных цепях управления работой электродетонаторов ядерного оружия [13]). В связи с возможностью использования крайatronов в электрических схемах подрыва ядерных боеприпасов [13, 14] на их вывоз из США были давно введены очень строгие экспортные ограничения. В настоящее время американской фирмой «Perkin-Elmer Components» производятся газонаполненные и вакуумные крайтроны-ключи [13]. Вакуумная разновидность крайatronа («spryttron») может работать в условиях высокой радиации, когда полупроводниковая техника работает неправильно и выходит из строя. В завершение данного раздела, посвященного ЭЛ, остановимся на таком газоразрядном приборе как «ксеноновая дуговая лампа» [15]. Эта лампа (рис. 8) является мощным источником искусственного света, близкого по своему спектральному составу к дневному свету.



Рис. 8. Общий вид ксеноновой дуговой лампы мощностью 15 кВт, применяемой в современном IMAX-проекторе [15]

В данной лампе ярко светится электрическая дуга в стеклянном баллоне, заполненном ксеноном. Ее баллон изготавливается из термостойкого кварцевого стекла. Катодом и анодом в такой лампе служат вольфрамовые электроды, легированные радиоактивным торием для уменьшения работы выхода из них электронов. Баллон первоначально вакуумируется, а затем в него подается ксенон. Импульсные ксеноновые лампы-вспышки содержат третий управляющий электрод, опоясывающий ее стеклянный баллон [15].

**2. Этап становления микроэлектроники и изобретение транзистора.** Электронные приборы, построенные на ЭЛ, обладали такими двумя существенными недостатками как: большие весогабаритные показатели и высокие уровни потребляемой электрической мощности (энергии) [2, 8]. Эти недостатки были критичными для создаваемых компьютеров, переносных электронных устройств, электроники авиационной и ракетно-

космической техники. Поэтому объективно стали создаваться и развиваться полупроводниковые приборы. Лежащая в их основе электроника получила название «*твердотельной электроники*» [2, 8]. Элементная база этой электроники на начальном этапе ее возникновения стала базироваться на транзисторах и полупроводниковых диодах. Как известно, транзистором называется полупроводниковый триод (рис. 9), который способен от небольшого входного сигнала управлять значительным током в его выходной цепи. Это свойство транзистора позволило использовать его для усиления, генерирования, коммутации и преобразования сигналов. Вслед за ЭЛ транзистор стал основой схемотехники большинства электронных устройств [16]. Когда и кем был создан этот прибор, совершивший «революцию» в электронике?



Рис. 9. Общий вид биполярных транзисторов различной конструкции, использующих на одном полупроводниковом кристалле три электрода – базу, управляющий электрод-эмиттер и управляемый электрод-коллектор [16, 17]

Из истории изобретения транзистора известно, что с 1936 г. в США в опытно-конструкторском подразделении «Bell Telephone Laboratories» крупной фирмы «American Telephone and Telegraph» под руководством Джозефа Бекера выполнялись работы по созданию твердотельных усилителей электрических сигналов [17]. До 1941 г. (до начала Второй мировой войны) изготовить полупроводниковый усилительный прибор в Bell Labs не удалось. В 1945 г. после окончания войны под руководством физика-теоретика Уильяма Шокли (William Shockley) в указанной лаборатории возобновились исследования, связанные с созданием полевого транзистора. После двух лет неудач физик-экспериментатор Уолтер Браттейн (Walter Brattain), работая 16 декабря 1947 г. с германиевым кристаллом, неожиданно для себя получил устойчивое усиление сигнала [17]. Его последующие исследования с физиком-теоретиком Джоном Бардином (John Bardeen) показали, что они, по сути, изобрели полупроводниковый триод, названный в дальнейшем «биполярным транзистором». На рис. 10 приведен внешний вид исследуемого макета этого транзистора [17].

Для читателя требуется дать небольшое пояснение насчет полевого (униполярного) и биполярного транзисторов. В «полевом транзисторе» используется полупроводник (например, кристалл германия или кремния) только одного типа проводимости, имеющий тонкий канал, на который воздействует электрическое поле изолированного от канала электрода-затвора [16]. Полевой транзистор, в отличие от биполярного триода, управляется не током, а напряжением, подаваемым на его затвор. В «биполярном транзисторе» используются полупроводники с обоими типами проводимости. Он работает за счет взаимодействия близко расположенных на одном кристалле полупроводника двух  $p-n$  переходов и управляется изменением тока через база-эмиттерный

переход [16]. Вывод его эмиттера обычно является общим для управляющего и выходного токов [3]. Делают это для того, чтобы в схемах с применением транзистора можно было получать усиление не только по напряжению, но и току. Кроме того, следует указать то, что научное открытие  $p-n$  перехода в кристаллическом кремнии было совершено в 1940 г. сотрудниками американской лаборатории «Bell Labs» Расселом Олом и Джоном Скаффом [17]. Эти физики-твердотельщики установили, что легирование поверхности кристалла кремния атомами бора приводит к его положительной  $p$ -проводимости, а атомами фосфора – к его отрицательной  $n$ -проводимости. Так были изобретены кремний  $p$ -типа и кремний  $n$ -типа, сыгравшие огромную роль в развитии твердотельной электроники [17]. В этой связи следует отметить то, что в 1941 г. независимо от физиков США украинский физик В.Е. Лашкарёв разработал теорию «запирающего слоя» и инъекции носителей заряда на границе раздела меди и окиси меди [17]. Обнаруженные им опытным путем с помощью термозонда два типа проводимости в медно-окисном элементе указывали на наличие между ними переходного слоя, препятствующего прохождению тока [17].

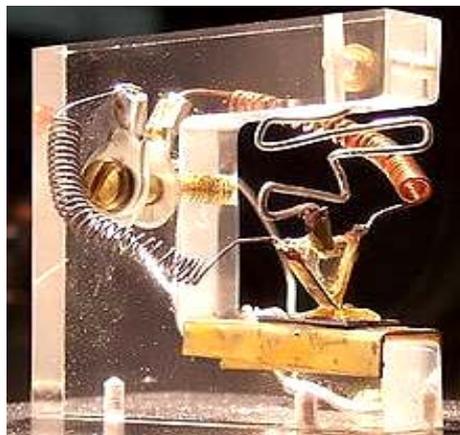


Рис. 10. Внешний вид современного макета транзистора Дж. Бардина и У. Браттейна (его оригинал не сохранился) [17]

23 декабря 1947 г. состоялась презентация действующего оригинал-макета (см. рис. 10) нового полупроводникового изделия – биполярного транзистора руководству лаборатории «Bell Labs» [17]. Именно эта дата и считается днем «рождения» транзистора. Узнав об этом успехе своих коллег, У. Шокли вновь подключается к полупроводниковым исследованиям и за короткое время создает теорию биполярного транзистора [17]. На рис. 11 изображены указанные американские ученые, открывшие транзисторный эффект [17]. Отметим, что в конце июня 1948 г. в указанной фирме США, где трудились первооткрыватели биполярного транзистора, был изготовлен первый радиоприемник на транзисторах [17]. Однако, мировой сенсации из-за изобретения в США и радиотехнического использования транзистора в то время не состоялось. Связано это было с тем, что первые точечные транзисторы, по сравнению с ЭЛ, имели низкие выходные характеристики. Только в 1956 г. научное открытие американских исследователей У. Браттейна, Дж. Бардина и У. Шокли было оценено Шведской академией наук по достоинству: его авторы за «исследования полупроводников и открытие транзисторного эффекта» стали лауреатами Нобелевской премии по физике [4].

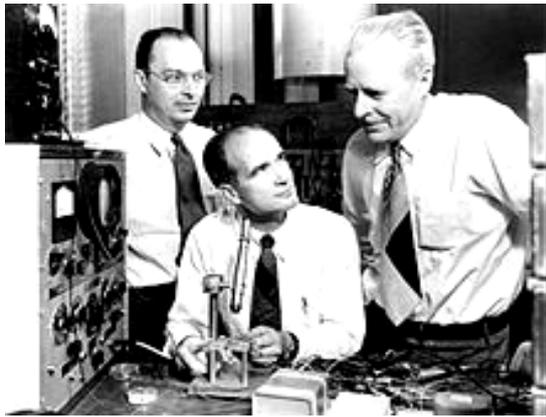


Рис. 11. Будущие лауреаты Нобелевской премии по физике в лаборатории «Bell Labs» (слева направо: Джон Бардин, Уильям Шокли и Уолтер Браттейн; США, 1948 г.) [17]

Укажем, что первые точечные транзисторы, несмотря на свою миниатюрность и экономичность, отличались высоким уровнем шума в полезных электрических сигналах, малой мощностью, нестабильностью характеристик во времени и сильной зависимостью выходных параметров от температуры [17]. Точечный транзистор, зоны двух близко расположенных друг от друга  $p-n$  переходов в котором выполнялись на одном кристалле германия точечным образом, из-за своей немонолитности был чувствителен к механическим ударам и вибрациям. В 1951 г. был создан первый плоскостной биполярный транзистор, конструктивно представляющий собой монолитный кристалл германия [17]. В это же время появились первые транзисторы на кристалле кремния (рис. 12). Выходные характеристики таких биполярных транзисторов стали успешно конкурировать с параметрами ЭЛ [17].



Рис. 12. Общий вид выращенного в вакууме технологами-материаловедами монокристаллического кремния [18]

Известны биполярные транзисторы  $p-n-p$  (прямой проводимости) и  $n-p-n$  (обратной проводимости) типов [19]. Эти транзисторы помимо основного полупроводникового материала, используемого чаще всего в виде монокристалла (тонкого плоского элемента от изображенного на рис. 12 большого монокристалла), содержат в своей конструкции легирующие добавки (обычно бора или фосфора) к основному полупроводнику, металлические выводы *базы*, *эмиттера* и *коллектора*, а также корпус (металлический или керамический) с изолирующими частями (см. рис. 9) [17].

Основными видами полупроводников в них стали кремний, германий и арсенид галлия. Укажем, что в биполярных транзисторах носители заряда движутся от эмиттера через тонкую базу к коллектору. База отделена от эмиттера и коллектора  $p-n$  переходами. Ток протекает через этот вид транзистора лишь тогда, когда носители заряда инжектируются из его эмиттера в базу через соответствующий  $p-n$  переход. В базе они являются не основными носителями заряда и легко проникают через его другой  $p-n$  переход между базой и коллектором. В базе транзистора носители заряда движутся за счёт диффузионного механизма. В этой связи она должна быть достаточно тонкой. Управление током между эмиттером и коллектором биполярного транзистора осуществляется изменением напряжения между базой и эмиттером, от которого зависят условия инжекции носителей заряда в базу [17, 19].

Что касается истории создания полевых транзисторов, то отметим, что впервые электрофизическая идея управления (регулирования) в полупроводниковом триоде с изолированным электродом-затвором потоком основных носителей заряда (электронов) была высказана еще Дж. Лиленфельдом (Патент США №1745175 от 28.01.1930 г.) [20]. Однако возникшие трудности в реализации этой идеи на практике позволили создать первый работающий полевой транзистор только в 1960 г. В 1966 г. Карвер Мид, шунтировав электроды такого полупроводникового прибора диодом Шоттки, существенно усовершенствовал конструкцию полевого транзистора [20]. Полевые транзисторы классифицируют на приборы с затвором в виде  $p-n$  перехода и с изолированным затвором. Последние транзисторы получили в электронике название МДП- транзисторов («металл-диэлектрик-полупроводник») [20]. Иногда МДП- транзисторы называют еще и как МОП- транзисторы («металл-оксид-полупроводник»). Кроме того, полевые транзисторы с изолированным затвором подразделяют на приборы со встроенным каналом и приборы с индуцированным каналом [20]. Укажем, что каналом в этих транзисторах называется область, через которую проходит поток их основных носителей заряда – электронов. Электроды полевых транзисторов имеют следующие названия [20]: *исток* (*source*) – электрод, из которого в канал входят основные носители заряда; *сток* (*drain*) – электрод, через который из канала уходят основные носители заряда; *затвор* (*gate*) – электрод, служащий для регулирования поперечного сечения канала. Проводимость рассматриваемого канала может быть как  $n$ - типа, так и  $p$ - типа. В этой связи по типу проводимости канала различают полевые транзисторы с  $n$ - каналом и  $p$ - каналом. В полевом МДП- транзисторе, содержащем один кристалл полупроводника (подложку), ток протекает от электрода-истока, нанесенного на сильно легированную область подложки кристалла полупроводника с  $n$ - проводимостью, до электрода-стока, нанесенного на сильно легированную область подложки кристалла полупроводника с  $p$ - проводимостью, через канал, находящийся под электродом-затвором. Расстояние между сильно легированными областями истока и стока составляет порядка одного микрона. Поверхность кристалла полупроводника между истоком и стоком покрыта тонким слоем (толщиной порядка 0,1 мкм) диэлектрика. Для кристалла кремния в качестве этого диэлектрика используется диоксид кремния  $SiO_2$ , выращенный на поверхности кристалла кремния путем ее высокотемпера-

турного окисления [20]. На слой диэлектрика между истоком и стоком наносится металлический электрод-затвор. Канал существует в легированных частях подложки кристалла полупроводника в промежутке между затвором и нелегированной подложкой полупроводника, в которой нет носителей заряда. Поэтому она (подложка) не может проводить ток. Под затвором существует область обеднения, в которой тоже нет носителей заряда благодаря образованию между легированной областью кристалла полупроводника и металлическим затвором контакта Шоттки [20]. Получается, что в этом типе полевого транзистора ширина канала ограничена пространством между подложкой и областью обеднения. Приложенное к затвору напряжение увеличивает или уменьшает ширину области обеднения рассматриваемого прибора и тем самым регулирует (изменяет) ширину канала такого транзистора. Таким путем в этом приборе изменяется проходящий через его канал ток.

В полевом транзисторе с управляющим  $p-n$  переходом применяется пластина-кристалл из полупроводника (например, с  $n$ - проводимостью), на противоположных концах-краях которой расположены электрод-исток и электрод-сток, включенные в управляемую цепь прибора. Между этими электродами размещен управляющий электрод-затвор, нанесенный на область полупроводника с другой проводимостью (например, с  $p$ - проводимостью). Источник питания, включенный во входную цепь прибора, создает на его единственном  $p-n$  переходе обратное напряжение. Во входную цепь такого транзистора также включается и источник усиливаемых сигналов. При изменении на затворе входного напряжения изменяется и обратное напряжение на  $p-n$  переходе. В нашем случае это будет приводить к изменению толщины и соответственно величины поперечного сечения области обедненного слоя в полевом транзисторе с  $n$ - каналом, через который проходит поток основных носителей зарядов (электронов) [20]. Изменением размеров сечения указанного канала и достигается изменение тока в выходной цепи этого типа полупроводникового триода.

Основными преимуществами полупроводниковых триодов перед вакуумными ЭЛ являются [16, 17]:

- малые размеры и вес, способствующие широкому развитию миниатюрных электронных устройств;
- малая стоимость, обусловленная автоматизацией производственно-технологических процессов;
- низкий уровень напряжения, способствующий применению транзисторов в малогабаритных электронных устройствах, запитываемых от батареек;
- отсутствие дополнительного времени на разогрев своих электродов после включения устройства;
- низкие показатели по рассеиваемой мощности (энергии), способствующие повышению энергоэффективности транзисторов и устройств в целом;
- высокая надежность в работе и большая механическая прочность к ударным нагрузкам и вибрациям отдельных полупроводниковых триодов и электронного устройства в целом, содержащего огромное число подобных полупроводниковых приборов;
- большой срок службы, исчисляемый десятками лет непрерывной работы в составе устройства;
- возможность сочетания в работе с дополнительными электронными схемами и устройствами.

Основными недостатками транзисторов по сравнению с вакуумными ЭЛ, являются [17, 21]:

- рабочее напряжение для транзисторов, использующих кристаллический кремний, не превышает 1 кВ (при коммутации электроцепей с напряжением более 1 кВ сейчас применяют IGBT- транзисторы);
- применение транзисторов в мощных радиовещательных и СВЧ- передатчиках оказывается технически и экономически нецелесообразным (использование для этих целей мощных генераторных радиоламп, магнетронов, клистронов и ламп бегущей волны обеспечивает более лучшее сочетание высоких частот, больших мощностей и приемлемой стоимости);
- транзисторы в сравнении с ЭЛ более уязвимы к воздействию такого поражающего фактора ядерного оружия как мощный электромагнитный импульс;
- повышенная чувствительность к поражающему воздействию радиации и космического излучения.

Заметим, что входное сопротивление для полевых МДП- транзисторов, использующих изолированный электрод-затвор, может составлять значения, изменяющиеся в диапазоне ( $10^{10}$ – $10^{14}$ ) Ом. У полевых транзисторов с управляющим  $p-n$  переходом эти показатели составляют ( $10^7$ – $10^9$ ) Ом [20]. Высокие значения входного сопротивления у полевых транзисторов позволяют применять их при создании высокоточных электронных устройств, работающих при низком напряжении с малой потребляемой энергией (например, электронных часов). Гибридный транзистор типа IGBT, объединивший свойства биполярного и полевого транзисторов, может использоваться в цепях мощной высоковольтной импульсной техники [8, 20].

Со временем транзисторы заменили по всему миру вакуумные ЭЛ в большинстве электронных устройств. Эти полупроводниковые приборы коренным образом изменили всю электронику нашего мира. Они стали той элементной базой, на которой возникла «микроэлектроника» и были созданы интегральные схемы и быстродействующие компьютеры [22]. В начале 21-го века транзисторы стали самым массовым изделием, производимым человечеством. Заметим, что в 2013 г. на каждого жителя планеты Земля электронной промышленностью мира было выпущено около 15 миллиардов транзисторов, большинство из которых входило в состав интегральных схем [16, 17].

**3. Промежуточный этап развития микроэлектроники и изобретение интегральной микросхемы.** Укажем, что в апреле 1954 г. сотрудник американской компании «Texas Instruments» Гордон Тил изготовил первый кремниевый биполярный транзистор. До 1957 г. указанная компания США была единственным поставщиком кремниевых транзисторов на мировом рынке микроэлектроники [17]. Изобретение Карлом Фрошем в США процесса «мокрого» (с использованием водяного пара) термического окисления кремния с целью получения на подложке полупроводника тонкого слоя диоксида кремния  $\text{SiO}_2$  сделало возможным выпуск в 1958 г. «Bell Labs» первых кремниевых меза-транзисторов. В марте 1959 г. Жан Эрни создал первый кремниевый планарный транзистор, в котором меза-технология была заменена на более перспективную планарную технологию изготовления транзисторов. Дальнейшее развитие физики и техники полупроводников привело к тому, что кремний практически вытеснил германий из микроэлектроники, а планарный процесс стал в мире электроники

основной технологией производства транзисторов и сделал возможным создание монолитных интегральных микросхем (ИМС) [17, 23]. Под ИМС (рис. 13) понимается электронная схема произвольной сложности, изготовленная на полупроводниковой подложке (кристаллической пластинке или пленке) и помещенная в неразборной пластмассовый (керамический) корпус [21, 23].

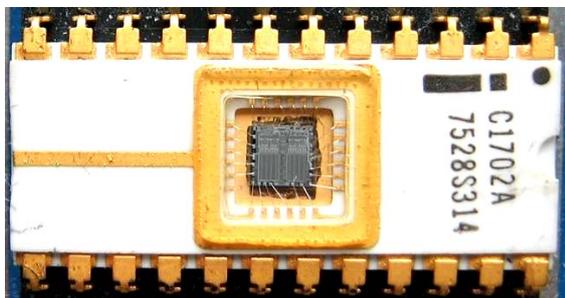


Рис. 13. Внешний вид ИМС, используемой в космической микроэлектронике с повышенным уровнем радиации [21]

Подавляющая часть ИМС в мире изготавливается в корпусах (см. рис. 13 и 14) и предназначена для их поверхностного монтажа на платах электронных устройств. Укажем, что незначительная часть ИМС, входящих в состав микросборок, выпускается без указанных корпусов. Часто ИМС называют еще «чипом» (от англ. «chip» – «тонкая пластинка» [1]). Британский радиотехник Джеффри Даммер (Geoffrey Dummer) 7 мая 1952 г. впервые выдвинул идею объединения множества стандартных электронных компонентов в одном монолитном кристалле полупроводника [23]. Эта прогрессивная идея ряд лет из-за недостаточного уровня развития в мире технологий по производству полупроводниковых приборов оставалась не реализованной на практике. Только в первой половине 1959 г. в мировой полупроводниковой технологии произошел настоящий прорыв, выполненный фактически тремя специалистами-практиками из трех частных американских корпораций, успешно решивших три фундаментальных проблемы для производства ИМС [23].

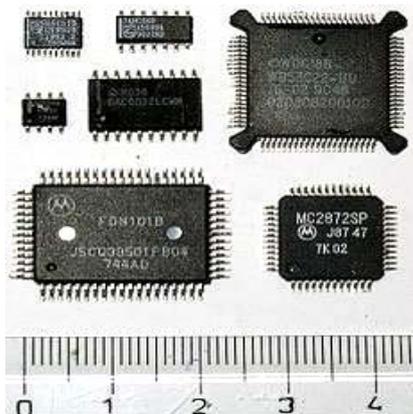


Рис. 14. Общие виды корпусных ИМС различной конструкции и степени интеграции, предназначенных для поверхностного монтажа на платах электронных устройств [23]

Так, американский физик и изобретатель Джек Килби (Jack Kilby) из «Texas Instruments» запатентовал принцип объединения электронных компонентов в ИМС с транзисторами, выполненными с последними  $p-n-p$  или  $n-p-n$  переходами (патент США был выдан в 1964 г.) [23, 24]. Следует отметить, что в 2000 г. Дж. Килби (1923 г. рождения) «за вклад в открытие

интегральной схемы» был удостоен Нобелевской премии по физике [24]. Далее, в это время американский инженер Курт Леговец (Kurt Legovics) из «Sprague Electric Company» изобрел способ электрической изоляции компонентов, сформированных на одном кристалле полупроводника (в качестве изоляции он предложил использовать  $p-n$  переходы) [23]. Именно тогда американский специалист Роберт Нойс (Robert Noyce) из «Fairchild Semiconductor» изобрел способ электрического соединения компонентов ИМС (за счет их металлизации алюминием) [23]. Кроме того, Р. Нойс в те годы предложил усовершенствованный вариант изоляции компонентов ИМС на базе новейшей планарной технологии Жана Эрни (Jean Hoerni). 27 сентября 1960 г. группа Джея Ласта (Jay Last) из «Fairchild Semiconductor» создала первую работоспособную ИМС по идеям Р. Нойса и Ж. Эрни.

Отметим, что в зависимости от степени интеграции электронных компонентов в одном кристалле полупроводника (как правило, кремния, германия, арсенида галлия или оксида гафния) в настоящее время применяются следующие названия ИМС [23]:

- малая интегральная микросхема (МИМС), содержащая до 100 электронных компонентов;
- средняя интегральная микросхема (СИМС), содержащая до 1000 электронных компонентов;
- большая интегральная микросхема (БИМС), содержащая до 10000 электронных компонентов;
- сверхбольшая интегральная микросхема (СБИМС), содержащая более 10000 электронных компонентов (дальнейшее увеличение электронных компонентов в одной микросхеме с доведением их числа до  $10^9$  и более уже не изменяет названия этой ИМС).

Подчеркнем то обстоятельство, что фактически с изобретением ИМС в электронике объективно появился ее новый раздел – «микроэлектроника», занимающаяся изучением и производством электронных компонентов, линейные геометрические размеры характерных элементов которых стали составлять единицы микрон и менее. Технологический процесс изготовления ИМС как полупроводниковой элементной базы в микроэлектронике непрерывно совершенствовался и совершенствуется и поныне [25]. Этот сложный комплексный процесс включает в себя последовательность ряда технологий [25–27]: по производству полупроводниковых материалов высокой чистоты, по изготовлению миниатюрных полупроводниковых элементов (транзисторов, диодов и др.), по контролю качества их изготовления, по сборке указанных электронных компонентов и по контролю качества их сборки. Согласно требованиям «электронной гигиены» в рабочей зоне обработки полупроводниковых пластин и на операциях сборки кристаллов ИМС не должно быть более пяти пылинок размером 0,5 мкм в 1 литре воздуха [18]. При производстве ИМС применяются технологии легирования кристалла полупроводника для получения  $p-n$  переходов и фотолитографии, реализуемой с помощью соответствующего литографического оборудования. Разрешающая способность (в мкм или нм) этого оборудования определяет название конкретного технологического процесса, используемого при изготовлении ИМС. Уменьшение размеров полупроводниковых структур в ИМС приводит к улучшению технических характеристик полупроводниковых приборов (например, к снижению их

энергопотребления, повышению рабочей частоты в их электронных цепях, повышению их быстродействия, уменьшению их стоимости и др.) [28]. Поэтому миниатюризация полупроводниковой элементной базы микроэлектроники стала основной мировой тенденцией при выпуске различных электронных устройств. Приведем ниже основные этапы развития в мире технологического процесса при производстве ИМС [23]:

- этап с разрешением (3-1,5) мкм (1970-е гг.);
- этап с разрешением (0,8-0,5) мкм (1980-е гг.);
- этап с разрешением (350-130) нм (1990-е гг.);
- этап с разрешением (65-10) нм (2000-е гг.).

Укажем, что в мае 2011 г. фирмой Altera была выпущена по технологическому процессу производства с разрешением 28 нм самая большая в мире на тот момент ИМС, состоящая из 3,9 миллиардов полевых транзисторов [23]. В 2012 г. самые маленькие транзисторы в ИМС содержали считанные атомы вещества. В одном процессоре современного компьютера их может содержаться более миллиарда штук. В ИМС применяются такие электронные компоненты обычной электроники как резисторы, конденсаторы, индуктивности, диоды, транзисторы, изоляторы и проводники [28]. Только используются эти компоненты в виде миниатюрных устройств, выполненных на одном кристалле полупроводника (рис. 15) в интегральном исполнении. В микроэлектронике ИМС подразделяют на цифровые, аналого-цифровые и аналоговые. Причем, цифровые ИМС состоят обычно из миниатюрных транзисторов, а аналоговые ИМС содержат миниатюрные резисторы, конденсаторы и индуктивности. Современная цифровая техника и используемые в ней ИМС в основном построены на полевых МДП- транзисторах, выполняемых на одном кремниевом кристалле (чипе). Эти транзисторы стали по существу «кирпичиком» для построения микросхем логики, памяти и процессоров компьютеров. Размеры современных МДП- транзисторов составляют от 90 до 8 нм [28, 29]. В настоящее время на одном кристалле полупроводника площадью до 1 см<sup>2</sup> может размещаться до нескольких миллиардов МДП- транзисторов [28]. Согласно закону Мура («число транзисторов в ИМС удваивается за каждые 18 месяцев») в ближайшие годы ожидается дальнейшее увеличение степени интеграции транзисторов на одном чипе [28].

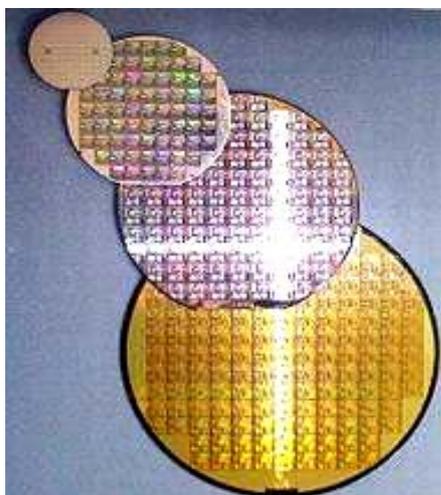


Рис. 15. Тонкие круглые пластинки из кремния с готовыми микросхемами перед разрезанием их алмазным микродиском на отдельные кристаллы данного полупроводника [28]

**4. Современный этап развития микроэлектроники и изобретение высокоинтегрированного микропроцессора.** ИМС стали основой процессоров (от лат. «processus» – «продвижение» [1]), являющихся центральной частью («сердцем») всех компьютеров, выполняющей заданные программой преобразования информации и осуществляющей управление всем вычислительным процессом в электронной вычислительной машине [28]. Как известно, «микропроцессор» формирует ядро вычислительной машины (рис. 16), в которой дополнительные функции (например, связи с ее периферией) выполняются с помощью специально разработанных наборов микросхем (чипсет) [23]. Компания США «Intel» в 1971 г. первой изготовила ИМС (Intel 4004), которая выполняла функции микропроцессора [23]. Другая американская фирма «IBM» на базе усовершенствованных микропроцессоров 8088 и 8086 выпустила свои известные персональные компьютеры серии PC/XT [23]. В первых компьютерах число наборов чипсет составляло до сотен штук. В современных компьютерах их число не превышает трех штук. В последнее время наблюдается тенденция постепенного переноса функций чипсета (контроллера памяти и др.) в микропроцессор [23, 28].

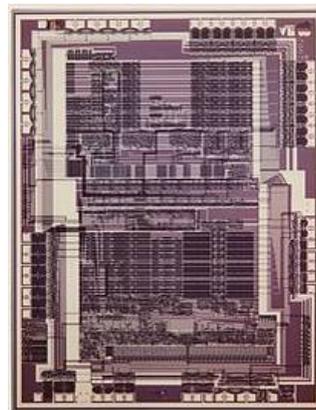


Рис. 16. Внешний вид внутренней начинки современного микропроцессора Apple одноименной фирмы США [18]

В этой связи микропроцессор со встроенными оперативными и программными запоминающими устройствами, контроллерами памяти, устройствами ввода-вывода и другими дополнительными функциями называют еще «микроконтроллером» [28]. Главной особенностью микроконтроллера является возможность программирования логики его работы. Размещение целого микропроцессора на одном чипе сверхбольшой степени интеграции (рис. 17), содержащего сотни миллионов электронных компонентов, привело к значительному снижению его стоимости [30]. Создание в конце 20-го столетия высокоинтегрированных микропроцессоров на одном кристалле обусловило их широкое применение в персональных компьютерах.

В настоящее время в микроэлектронике используются микропроцессорные системы, представляющие собой функционально законченные изделия, состоящие из одного или нескольких микропроцессоров (микроконтроллеров, рис. 18) [30]. В современных электронных устройствах находят применение также многоядерные (massively multi-core) процессоры, являющиеся центральными процессорами, содержащими два или несколько вычислительных ядра на одном процессорном полупроводниковом (кремниевом) кри-

сталле [30]. В таком процессоре его несколько ядер являются интегрированными на одну СБИМС. Понятие «многоядерное электронное устройство» может использоваться и при описании работы многоядерных систем (например, вычислителей типа Intel MIC [30]).

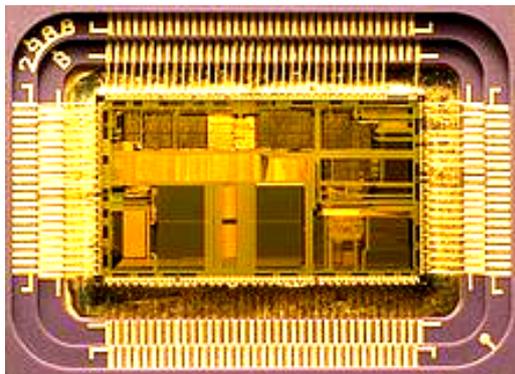


Рис. 17. Общий вид кремниевого кристалла микропроцессора 80486DX2 в корпусе для персонального компьютера [30]

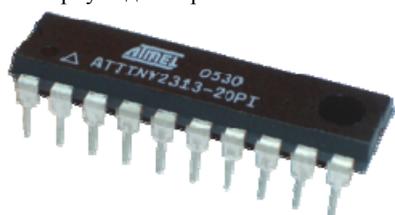


Рис. 18. Внешний вид современного микроконтроллера Attiny2313-20PI американской фирмы Atmel [30]

Микроконтроллер (от англ. «controller» – «управитель» [1]) является по существу ИМС (см. рис. 18), предназначенной для управления работой различных электронных устройств. Он представляет собой, по большому счету, однокристалльный микрокомпьютер. Первый патент США на микро-ЭВМ или микроконтроллер был выдан в 1971 г. сотрудникам американской компании «Texas Instruments», инженерам М. Кочрену и Г. Буну [30]. Именно они впервые предложили не только микропроцессор, но и память с устройствами ввода-вывода цифровой информации. В 1976 г. американская фирма «Intel» выпустила микроконтроллер i8048. В 1980 г. эта электронная фирма создала микроконтроллер i8051, на кремниевом кристалле которого было размещено 128 тыс. полевых транзисторов. Удачный набор периферийных устройств, возможность гибкого выбора внешней и внутренней программной памяти и приемлемая цена обеспечили этому микроконтроллеру успех на рынке электроники. На сегодняшний день существует более 200 модификаций микроконтроллеров, совместимых с i8051, выпускаемых двумя десятками компаний мира [30].

Непрерывное увеличение сложности микропроцессоров привело в мире электроники к тому, что сейчас один или несколько микропроцессоров используются в качестве вычислительных элементов во всех электронных устройствах, начиная от мобильного телефона и заканчивая мейнфреймами и суперкомпьютерами [30]. Достижения человечества в освоении космоса, начиная с конца 1960-х годов, обязаны применению на борту космических аппаратов компьютерной техники. Так, в космической программе НАСА США, связанной с первой посадкой человека на Луну (20 июля 1969 г. [31]), все бортовые вычисления для наведения, навигации и управ-

ления на космическом корабле «Аполлон-11» были предоставлены небольшим специализированным микропроцессором на кристалле кремния его бортового компьютера [30]. Эти электронные устройства были разработаны и изготовлены новой «молодой» американской компанией «Fairchild Semiconductor», обосновавшейся в перспективном технологическом районе США. Тогда же другая компания США «Texas Instruments» разрабатывала и производила германиевые ИМС для межконтинентальных баллистических ракет «Минитмен-2» [32].

**4.1. «Кремниевая долина» США и технологический прорыв в микроэлектронике.** Северная часть территории штата Калифорния (вблизи г. Сан-Франциско), на которой сосредоточено в настоящее время около половины всего научно-технического потенциала США в области электроники и вычислительной техники, получила название «Кремниевой долины» («Silicon Valley») [32]. Именно многочисленные электронные фирмы США (рис. 19), образовавшиеся на территории «Кремниевой долины», и внесли в 20-ом веке определяющий вклад в начало бурного развития мировой микроэлектроники. Именно с них начался процесс широкого применения ИМС в военной технике и технике гражданского назначения [32].



Рис. 19. Общий вид зданий некоторых компаний, входящих в состав крупнейшего технологического центра США [32]

Возникновение и активное развитие этого высокотехнологического центра США связано с сосредоточением на этой территории (с неофициальной столицей г. Сан-Хосе) ведущих американских университетов, городов на расстоянии друг от друга в менее часа езды, крупных источников финансирования новых компаний, а также климатом средиземноморского типа. Принято считать [32], что основателями «Кремниевой долины» были такие американские ученые как Уильям Шокли (рис. 20) и Фредерик Терман (рис. 21).

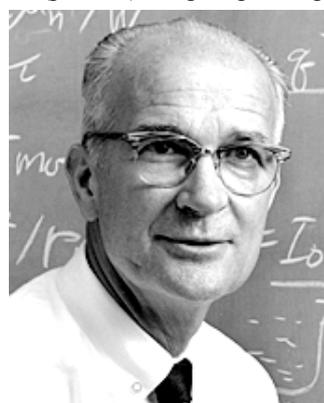


Рис. 20. Один из отцов-основателей «Кремниевой долины» («Silicon Valley») в американском штате Калифорния, профессор физики Уильям Шокли (William Shockley) [32]

Именно в этом регионе США с 1960-х годов началось активное применение кремния при наиболее передовом в мире производстве полупроводниковых приборов (транзисторов и ИМС). Сюда в 1956 г. переехал один из соавторов открытия транзисторного эффекта физик У. Шокли и основал свою компанию «Shockley Semiconductor Laboratory» в Маунтин-Вью, занимающуюся разработкой новой технологии использования кремния при производстве транзисторов [32]. Германий к этому времени зарекомендовал себя дорогим полупроводниковым материалом в получении и не устойчивым к повышенным температурам.



Рис. 21. Один из отцов-основателей «Кремниевой долины» («Silicon Valley») в американском штате Калифорния, профессор электротехники Стэнфордского университета США Фредерик Терман (Frederick Terman) [32]

Авторитарный стиль руководства У. Шокли и увлечение им собственной разработкой 4-х слойного полупроводникового диода привели к тому, что его восемь наиболее талантливых физиков и специалистов («Вероломная восьмерка» – «Traitorous Eight») покинули его компанию и вскоре на средства своего спонсора Шермана Ферчилда создали новую электронную компанию «Fairchild Semiconductor» [32]. Для У. Шокли и его бизнеса это событие имело плачевные последствия: вскоре убыточная компания «Shockley Semiconductor Laboratory» прекратила свое существование, а ее руководитель был вынужден уйти на преподавательскую работу в должности профессора в недалеко расположенный Стэнфордский университет США. Важно отметить, что У. Шокли как первооткрыватель транзисторного эффекта и автор важнейших работ по теории полупроводников в конце своей жизни считал своим главным научным достижением, как не парадоксально, вклад в генетику [32].

Компания «Fairchild Semiconductor» под руководством Роберта Нойса в своей деятельности придерживалась новой прогрессивной на то время социально-технической идеологии: *«Изобретения в технике могут изменить мир»*. Каждый ее сотрудник думал о своем личном вкладе в прогресс микроэлектроники. В этой компании сложилась новая корпоративная культура при разработке и производстве полупроводниковых приборов, включающая демократический стиль руководства и строгую трудовую дисциплину. Компания «Fairchild Semiconductor» оказалась успешным коммерческим проектом США в области микроэлектроники. Она стала мировым лидером в области создания транзисторов и ИМС на базе кристаллов кремния. Именно эта компания положила начало ряду но-

вых электронных компаний в «Кремниевой долине». Так, двое из указанной «восьмерки» (Gordon Moore и Robert Noyce), покинув электронную компанию «Fairchild Semiconductor», создали новую компанию «Intel», занимающуюся на первом этапе магнитными накопителями памяти. Затем в «Intel» последовали изобретения Р. Нойсом кремниевой ИМС и создание на ее базе первого чипового микропроцессора (1971 г.), ставшего в будущем принципиальной основой всех электронных устройств современности [32]. К 1980 г. лавинообразное деление электронных компаний в «Кремниевой долине» привело к созданию калифорнийского высокотехнологического парка (кластера), включающего 65 компаний, занимающихся разработкой и производством компьютеров и их составных частей, особенно микропроцессоров, а также программного обеспечения, устройств мобильной связи и биотехнологиями. По состоянию на 2006 г. «Кремниевая долина» стала в США третьим технологическим центром (после г. Нью-Йорка и г. Вашингтона) в области высоких технологий. В этом центре к указанному времени трудилось около 386 тыс. высококвалифицированных специалистов при их среднем годовом доходе около 80 тыс. \$ USA [32]. Совместными усилиями компании «Кремниевой долины» в период 20-21-го столетий совершили настоящий технологический прорыв в области микроэлектроники.

**4.2. Ближайшие перспективы, основные тенденции и проблемы в развитии мировой микроэлектроники.** В настоящее время в мировой электронике стали развиваться исследования по разработке и созданию новых вакуумных микроприборов на базе ИМС с автоэлектронной эмиссией [33]. Эти новые полупроводниковые приборы обладают сверхвысоким быстродействием, высокой стойкостью к радиации, слабой чувствительностью к температуре среды и большим КПД. Данная электроника получила название «вакуумной микроэлектроники», базирующейся на вакуумных интегральных микросхемах (ВИМС).

**4.2.1. Вакуумная микроэлектроника.** Считается, что функциональные возможности ВИМС будут существенно отличаться от возможностей существующих ИМС. Вакуумная микроэлектроника становится одним из важнейших направлений в развитии СВЧ электроники, используемой в радиолокационных комплексах, телекоммуникационных устройствах и системах обработки информации [33]. Связано это с тем, что традиционная полупроводниковая техника уже не в состоянии в условиях экстремальных воздействий окружающей среды обеспечивать высоконадежную передачу, прием, хранение и обработку в реальном масштабе времени очень больших по объему потоков информации. По этой причине в последние десятилетия во всех ведущих странах мира проводятся интенсивные работы, связанные с изучением фундаментальных проблем вакуумной микроэлектроники.

**4.2.2. Вакуумная наноэлектроника.** В последние годы специалисты все больше внимания уделяют электронике, использующей автоэмиссионные свойства углеродных нанотрубок (англ. CNT). Этот новый раздел в электронике получил название «вакуумной наноэлектроники» [33]. Основные усилия в данной области электроники направлены сейчас на разработ-

ку и создание плоских экранов дисплеев и телевизоров на основе CNT. В 2005 г. компания «Motorola» сообщила о создании прототипа дисплея на базе CNT. В 2006 г. корпорация «Samsung» продемонстрировала свой прототип дисплея на базе CNT, панель которого имела толщину 30 мкм [33]. Отметим, что в своих разработках эта корпорация успешно сотрудничает с американской компанией «Carbon Nanotechnologies Inc.», которая поставляет ей указанные нанотрубки. Видимо, не «за горами» создание в электронике плоскопанельных телевизоров на базе новой технологии. Согласно [33] проблема появления в быту людей дисплея, пространственно и энергетически сопрягаемого с ИМС, наилучшим образом решается путем создания плоского катодолюминесцентного экрана с автоэлектронным наноструктурированным катодом. Поэтому можно говорить о том, что вакуумная микроэлектроника и вакуумная наноэлектроника позволяют создать принципиально новые вакуумные лампы СВЧ диапазона, а также принципиально новые и высокоэффективные плоские катодолюминесцентные дисплеи [33].

**4.2.3. Новые тенденции при создании ИМС.** В последние десятилетия стремительно развивается технология изготовления полевых транзисторов на высокоподвижных электронах (ТВПЭ), которые широко используются в СВЧ устройствах связи и радионаблюдения. На основе ТВПЭ создаются как гибридные, так и монолитные микроволновые интегральные схемы. В основе действия ТВПЭ лежит управление их проводящим каналом с помощью двумерного электронного газа, область которого создается под контактом электрода-затвора полевого транзистора благодаря применению в нем гетероперехода и очень тонкого диэлектрического слоя-спейсера [20]. Для практической реализации СБИМС создаются сверхминиатюрные полевые микротранзисторы. Они изготавливаются с применением нанотехнологий с геометрическим разрешением оборудования менее 100 нм. У таких полупроводниковых приборов толщина подзатворного диэлектрика транзистора доходит до нескольких атомных слоев. Благодаря этому в современных микропроцессорах американской корпорации «Intel» число электронных компонентов составляет от десятков миллионов до двух миллиардов штук [20].

**4.2.4. Космическая микроэлектроника.** К микроэлектронике, предназначенной для использования в космических и военных целях, предъявляются повышенные требования по [21]: надежности ИМС (как кристалла полупроводника, так и корпуса), устойчивости к мгновенной дозе гамма и нейтронного излучения, стойкости к мощному электромагнитному импульсу ядерного взрыва, устойчивости к вибрациям и механическим перегрузкам, устойчивости к повышенной влажности и температуре среды (от  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Самой большой проблемой космической микроэлектроники является защита бортовых электронных устройств от поражающего воздействия на них тяжелых космических заряженных частиц, обладающих высокой энергией, достаточной для «пробития» их ИМС насквозь с образованием за собой мощного «шлейфа» электрических зарядов [21]. На рис. 22 показана современная СБИМС для применения на искусственных спутниках и космических аппаратах.

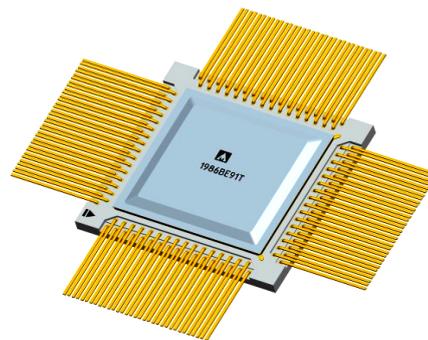


Рис. 22. Внешний вид СБИМС в металлокерамическом корпусе, предназначенной для использования в космосе [21]

Кроме того, следует заметить, что вокруг нашей планеты имеется два мощных пояса заряженных частиц (так называемые радиационные пояса Ван Аллена) [21]: один на высоте около 4000 км, состоящий из протонов, а другой на высоте около 17000 км с потоком электронов. Уровень космической радиации на высотах (300-500) км над Землей, где обычно летают спутники и космические аппараты, такой, что годовая доза радиации там достигает  $100\text{ рад}=1\text{ Дж/кг}=1\text{ Грэй}$  [34]. На высотах более 1000 км годовая доза радиации может составлять 10000 рад и более [21]. Для обычных коммерческих ИМС «смертельная» доза радиации составляет около 5000 рад. Поэтому за несколько месяцев полета в таких космических условиях обычные ИМС наберут свою «смертельную» дозу радиации и выйдут из строя. В этой связи для полетов космических аппаратов на высоких орбитах ( $\geq 1000\text{ км}$ ) и в дальнем космосе для их электронных устройств нужны специальные радиационно-стойкие ИМС [21].

**4.2.5. Оптоэлектроника.** В начале 21-го века эволюция твердотельной электроники в направлении миниатюризации электронных компонентов постепенно приостановилась и в настоящее время практически остановлена [2]. Эта остановка была предопределена достижением в этом виде электроники минимально возможных размеров полупроводниковых транзисторов, проводников и других компонентов на кристалле полупроводника, способных отводить (рассеивать) выделяемое на них тепло при протекании через них электрических зарядов (тока) и не разрушаться. Эти геометрические размеры в микрочипах достигли единиц нанометров, что и обусловило название технологии по их производству – нанотехнологией [18]. В этой связи возможно в ближайшем будущем следующим этапом в эволюции мировой электроники станет «оптоэлектроника», в которой несущим энергоинформационным элементом выступает такая квантовая квазичастица без массы покоя как фотон, значительно более подвижный и менее инерционный по своей физической природе представитель микромира чем свободный электрон («дырка») в кристалле полупроводника твердотельной электроники.

**4.2.6. Кибербезопасность.** Проблемной задачей мирового уровня в микроэлектронике является обеспечение кибербезопасности компьютерных систем как частных и государственных компаний, так и компьютеров отдельных граждан. В последние годы кибератаки хакеров по всему миру приобрели массовый и системный характер. Простых и надежных защитных мер и решений от подобных атак в области кибербезопасности в настоящее время не существует.

## Выводы.

1. Выполненный научно-технический обзор развития за период 20-21-го столетий мировой электроники свидетельствует об огромном технологическом прорыве человечества в этой очень сложной области знаний, направленном на службу обществу. Электроника находится на «пороге» новых открытий.

2. Электроника проникла практически во все сферы человеческой деятельности. Техносфера землян стала просто не мыслима без электронных устройств (например, компьютеров, микропроцессоров и др.). Объективный процесс развития нашей цивилизации привел к полной зависимости человека от электроники и ее научно-технических достижений. Электроника принесла людям много благ и удобств. Но вместе с этим в монополизме электроники для человечества кроется и скрытая угроза. Преднамеренный или аварийный непреднамеренный одновременный выход из строя основных и дублирующих электронных устройств систем управления на ответственных технических объектах (например, на атомных электростанциях, ядерных производствах и военных центрах управления ракетами стратегического назначения) может привести к катастрофическим последствиям для крупных регионов развитых стран мира.

3. Проблема кибербезопасности электронных устройств и компьютерных систем военного и гражданского назначения в настоящее время приобретает особую актуальность и значимость. Разработке и широкому внедрению в электронную практику эффективных мер и средств борьбы с кибератаками (кибертерроризмом) должно всегда уделяться повышенное внимание соответствующих служб и специалистов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
2. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Электроника>.
3. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 1: Электрофизика и выдающиеся физики мира. – Х.: НТУ «ХПИ», 2008. – 252 с.
4. Храмов Ю.А. История физики. – Киев: Феникс, 2006. – 1176 с.
5. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Электронная\\_лампа](https://ru.wikipedia.org/wiki/Электронная_лампа).
6. <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1114547>.
7. <https://wiki.rock63.ru/Радиолампа>.
8. [http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc\\_tech/1440/Электроника](http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_tech/1440/Электроника).
9. [http://www.petrofflab.ru/p/blog-page\\_12.html](http://www.petrofflab.ru/p/blog-page_12.html).
10. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Тиратрон>.
11. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Тригатрон>.
12. Дашук П.Н., Зайенц С.Л., Комельков В.С., Кучинский Г.С., Николаевская Н.Н., Шкуропат П.И., Шнеерсон Г.А. Техника больших импульсных токов и магнитных полей. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.
13. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Крайтрон>.
14. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 40: Научное открытие метода взрывной импlosion для получения сверхкритической массы ядерного заряда и украинский «след» в американском атомном проекте «Манхэттен» // Электротехника и электромеханика. – 2017. – №5. – С. 3-13. doi: 10.20998/2074-272X.2017.5.01.
15. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Ксеноновая\\_дуговая\\_лампа](https://ru.wikipedia.org/wiki/Ксеноновая_дуговая_лампа).
16. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Транзистор>.
17. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Изобретение\\_транзистора](https://ru.wikipedia.org/wiki/Изобретение_транзистора).
18. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Технологический\\_процесс\\_в\\_электронной\\_промышленности](https://ru.wikipedia.org/wiki/Технологический_процесс_в_электронной_промышленности).
19. Овсянников Н.И. Кремниевые биполярные транзисторы. Справочное пособие. – Минск: Высшая школа, 1989. – 302 с.
20. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Полевой\\_транзистор](https://ru.wikipedia.org/wiki/Полевой_транзистор).

21. <https://cont.ws/@nikkuro/514968>.
22. Ефимов И.Е., Козырь И.Я., Горбунов Ю.И. Микроэлектроника. – М.: Высшая школа, 1987. – 416 с.
23. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Интегральная\\_схема](https://ru.wikipedia.org/wiki/Интегральная_схема).
24. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике: Монография в 3-х томах. Том 3. – Х.: ФЛП Панов А.Н., 2016. – 415 с.
25. Черняев В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. – М.: Радио и связь, 1987. – 464 с.
26. Готра З.Ю. Справочник по технологии микроэлектронных устройств. – Львов: Каменяр, 1986. – 287 с.
27. Бер А.Ю., Минскер Ф.Е. Сборка полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. – М.: Высшая школа, 1986. – 279 с.
28. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Микроэлектроника>.
29. Рабаи Ж., Чандракасан А., Николич Б. Цифровые интегральные схемы. Методология проектирования. – М.: Вильямс, 2007. – 912 с.
30. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Микропроцессор>.
31. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике: Монография в 3-х томах. Том 2. – Х.: НТМТ, 2013. – 333 с.
32. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Силиконовая\\_долина](https://ru.wikipedia.org/wiki/Силиконовая_долина).
33. <http://www.pandia.ru/text/78/325/3338.php>.
34. Кухлинг Х. Справочник по физике / Пер. с нем. под ред. Е.М. Лейкина. – М.: Мир, 1982. – 520 с.

## REFERENCES

1. *Bol'shoj illjustrirovannyj slovar' inostrannyh slov* [Large illustrated dictionary of foreign words]. Moscow, Russkie slovari Publ., 2004. 957 p. (Rus).
2. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Electronics> (accessed 11 June 2012).
3. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografija v 2-h tomah. Tom 1: Elektrofizika i vydajushhiesja fiziki mira* [Selected topics electrophysics: Monographs in 2 vols. Vol.1: Electrophysics and outstanding physics of the world]. Kharkov, NTU «KhPI» Publ., 2008. 252 p. (Rus).
4. Khramov Yu.A. *Istoriia fiziki* [History of Physics]. Kiev, Feniks Publ., 2006. 1176 p. (Rus).
5. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum\\_tube](https://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum_tube) (accessed 22 May 2013).
6. Available at: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1114547> (accessed 10 April 2013). (Rus).
7. Available at: <https://wiki.rock63.ru/Радиолампа> (accessed 25 September 2014). (Rus).
8. Available at: [http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc\\_tech/1440/Электроника](http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_tech/1440/Электроника) (accessed 16 June 2015). (Rus).
9. Available at: [http://www.petrofflab.ru/p/blog-page\\_12.html](http://www.petrofflab.ru/p/blog-page_12.html) (accessed 25 January 2014). (Rus).
10. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Thyratron> (accessed 06 August 2014).
11. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Trigatron> (accessed 10 May 2015).
12. Dashuk P.N., Zayents S.L., Komel'kov V.S., Kuchinskiy G.S., Nikolaevskaya N.N., Shkuropat P.I., Shneerson G.A. *Tehnika bol'shih impul'snyh tokov i magnitnyh polej* [Technique large pulsed currents and magnetic fields]. Moscow, Atomizdat Publ., 1970. 472 p. (Rus).
13. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Kryttron> (accessed 20 April 2014).
14. Baranov M.I. An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 40: The scientific opening of the method of explosive implosion for the obtaining above critical mass of nuclear charge and Ukrainian «track» in the «Manhattan» American atomic project. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.5, pp. 3-13. doi: 10.20998/2074-272X.2017.5.01.
15. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Xenon\\_arc\\_lamp](https://en.wikipedia.org/wiki/Xenon_arc_lamp) (accessed 21 February 2014).
16. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor> (accessed 12 March 2013).

17. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_the\\_transistor](https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_transistor) (accessed 28 June 2013).
18. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Semiconductor\\_device\\_fabrication](https://en.wikipedia.org/wiki/Semiconductor_device_fabrication) (accessed 16 October 2013).
19. Ovsyannikov N.I. *Kremnievye bipoljarnye tranzistory. Spravochnoe posobie* [Silicon bipolar transistors]. Minsk, Higher School Publ., 1989. 302 p. (Rus).
20. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Field-effect\\_transistor](https://en.wikipedia.org/wiki/Field-effect_transistor) (accessed 19 July 2013).
21. Available at: <https://cont.ws/@nikkuro/514968> (accessed 08 December 2012).
22. Ephimov I.E., Kozyr' I.J., Gorbunov Yu.I. *Mikroelektronika* [Microelectronics]. Moscow, Higher School Publ., 1987. 416 p. (Rus).
23. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Integrated\\_circuit](https://en.wikipedia.org/wiki/Integrated_circuit) (accessed 22 May 2014).
24. Baranov M.I. *Antologija vydajushhihsja dostizhenij v nauke i tehnikе: Monografija v 3-h tomah. Tom 3* [An anthology of the distinguished achievements in science and technique: Monograph in 3 volumes. Volume 3]. Kharkiv, PhPB Panov A.N. Publ., 2016. 415 p. (Rus).
25. Chernyaev V.N. *Tehnologija proizvodstva integral'nyh mikroshem i mikroprocessorov* [The technology of production of integrated microcircuits and microprocessors]. Moscow, Radio and Communication Publ., 1987. 464 p. (Rus).
26. Gotra Z.Yu. *Spravochnik po tehnologii mikroelektronnyh ustrojstv* [Handbook of microelectronic devices technology]. Lviv, Kamenyar Publ., 1986. 287 p. (Rus).
27. Ber A.Yu., Minsker F.E. *Sborka poluprovodnikovyh priborov i integral'nyh mikroshem* [The assembly of semiconductor devices and integrated microcircuits]. Moscow, Higher School Publ., 1986. 279 p. (Rus).
28. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Microelectronics> (accessed 11 May 2014).
29. Rabay J., Chandrakasan A., Nikolic B. *Cifrovye integral'nye shemy. Metodologija proektirovanija* [Digital integrated circuits. Methodology of designing]. Moscow, Willyams Publ., 2007. 912 p. (Rus).
30. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Microprocessor> (accessed 18 October 2013).
31. Baranov M.I. *Antologija vydaiushchikhsia dostizhenij v nauke i tehnikе: Monografija v 2-kh tomakh. Tom 2*. [An anthology of outstanding achievements in science and technology: Monographs in 2 vols. Vol.2]. Kharkov, NTMT Publ., 2013. 333 p. (Rus).
32. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon\\_Valley](https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon_Valley) (accessed 20 May 2014).
33. Available at: <http://www.pandia.ru/text/78/325/3338.php> (accessed 10 October 2012). (Rus).
34. Kuhling H. *Spravochnik po fizike. Per. s nem.* [Dictionary on Physics. Translated from German]. Moscow, Mir Publ., 1982. 520 p. (Rus).

Поступила (received) 31.05.2017

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., г.л.н.с.,  
НИПКИ «Молния»  
Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,  
тел/phone +38 057 7076841,  
e-mail: baranovmi@kpi.kharkov.ua

M.I. Baranov

Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute «Molniya», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

**An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 42: Electronics: retrospective view, successes and prospects of its development.**

**Purpose.** Preparation of brief scientific and technical review about sources, retrospective view, basic stages, achievements, problems, trends and prospects of development of world electronics for period of 20th-21st centuries. **Methodology.** Known scientific methods of collection, analysis and analytical treatment of the opened scientific and technical information of world level in area of a vacuum electronics, semiconductor electronics, vacuum microelectronics and nanoelectronics, and also optical electronics. **Results.** A brief analytical scientific and technical review is resulted about the primary and present states, achievements, trends and prospects of development of electronics in the developed countries of the world. From positions of approach of the systems advantages and lacks of semiconductor microelectronics are described as compared to a vacuum electronics. Considerable progress is marked in development of semiconductor element base (microtransistors, microprocessors, microcontrollers and other) for creation of different electronic devices and computing engineering. Information, touching the determining deposit of electronic companies of the «Silicon Valley» in the USA in providing of technological breach in area of modern microelectronics, production of computers and their microprocessors, software and creation of devices of mobile communication development, is resulted. The basic problems of space microelectronics are affected. The possible ways of further development are indicated in the world of electronics, including vacuum microelectronics and nanoelectronics, and also optical electronics. The special attention is turned for urgent development of high-efficiency protective facilities specialists against cyber attacks hackers on the computer systems. In a review an accent is done on the sharp necessity of acceptance the proper services of drastic measures for a fight with cyber terrorism. **Originality.** Systematization of the scientific and technical materials touching world history of development and creation of modern element base of a vacuum electronics and semiconductor microelectronics known from the sources opened in outer informative space is executed. Possible new perspective directions of development in the modern world of microelectronics are formulated. **Practical value.** Popularization and deepening for students, engineer and technical specialists and research workers of front-rank scientific and technical knowledge in the topical area of development, creation and application in the modern technique of the different setting of high-computer-integrated electronic devices, extending their scientific range of interests and further development of scientific and technical progress in society. References 34, figures 22.

**Key words:** vacuum electronics, radio lamp, solid state microelectronics, transistor, integrated circuit, microprocessor, vacuum integrated circuit, vacuum microelectronics and nanoelectronics, trends and prospects of electronics development.