

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

Полупроводники в современном мире¹

В.С. Вавилов

В предельно краткой форме приводятся сведения о некоторых из наиболее важных достижений современной электроники и энергетики, основанных на физике полупроводников.

PACS numbers: 85.30.-z, 72.80.Cw, 72.80.Ey

Введение

В конце XX в. люди находятся под сильнейшим воздействием информации, влияющей на нас вследствие развития твердотельной "полупроводниковой" электроники.

Назовем некоторые из наиболее известных всем полупроводниковых приборов и областей их применений:

1) Компьютеры и запоминающие устройства.

2) "Дисплеи", т.е. люминесцентные или иные видимые глазом человека управляемые изображения, позволяющие нам воспринимать данные, полученные компьютером или записанные с помощью оптических приборов.

3) Цветное телевидение: в экранах, используемых в наши дни, явление катодoluminesценции, подробно изученное физиками, позволяет глазам человека наблюдать изображения. Люминесцирующие экраны состоят из тщательно технологически отработанных слоев полупроводников.

4) Солнечные батареи — надежный и экологически чистый источник электрической энергии.

5) Детекторы и дозиметры, необходимые для обнаружения и определения интенсивности опасных излучений.

Существует аналогия между рычагом Архимеда, или способом управления потоком воды путем открытия и закрытия затвора (шлюза), процессами в вакуумном триоде, давно изобретенном Ли де Форестом, и действием транзистора, открытом Бардином, Брэттеном и Шокли. Уместно напомнить, что "кристаллические детекторы", аналогичные вакуумным диодам с горячим катодом, существовали уже в начале XX в. Кристаллические детекторы с точечным контактом между иглой (острием) из твердого металла и кристаллом полупроводника были ненадежными и капризными, и параллельное развитие технологии вакуумных приборов привело к

тому, что полупроводниковые приборы в то время не выдержали конкуренции с ними, особенно в связи с требованием военной техники в области радиосвязи, или "беспроволочного телеграфа" (wireless) во время Первой мировой войны 1914–1918 гг.

Считаю справедливым упомянуть о пионерских работах русского физика и изобретателя Олега Владимировича Лосева, выполненных в Петрограде (Ленинграде) и опубликованных в 1923–1928 гг., когда им была обнаружена генерация высокочастотных колебаний тока, а также испускание света (люминесценция) в кристаллах карбида кремния SiC, содержавших спонтанно возникавшие барьеры между совершенно различными по электрофизическим и оптическим свойствам областями, которые мы теперь называем *p-n*-переходами.

Нельзя исключить возможность того, что если бы в те трудные годы существовал более эффективный обмен научной информацией между Россией, странами Западной Европы и Соединенными Штатами Америки, твердотельная (полупроводниковая) электроника могла бы возникнуть на много лет раньше, чем это произошло в реальной истории. Удобно рассматривать существование "триады" твердых тел:

| | | |
|--------------------|-----------------------|--------------------|
| <i>Металлы</i> | <i>Полупроводники</i> | <i>Диэлектрики</i> |
| (Железо, алюминий) | (Кремний) | (Алмаз, стекла) |

Главная особенность, отделяющая металлы, с одной стороны, и полупроводники и диэлектрики, с другой, определяется *восприимчивостью* к возбуждению их электронных подсистем такими воздействиями, как свет (фотоны), а также "жесткая" радиация, т.е. заряженные частицы высокой энергии, или к воздействию сильных электрических полей. Выдающийся советский физик Абрам Федорович Иоффе рассматривал любую систему, в которой можно, возбуждив ее, создать большое число неравновесных носителей заряда, как полупроводник. Его аргументы, судя по многим фактам, справедливы: процессы в газовой плазме и электронные явления в жидкостях во многих отношениях аналогичны

В.С. Вавилов. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 117924 Москва, Ленинский проспект 53
Тел. (095) 135-05-51
Факс (095) 138-22-51
E-mail: dravin@sci.fian.msk.su

Статья поступила 4 января 1994 г.

¹ Доклад на Общем собрании Афинской академии наук 18 октября 1994 г.)

процессам в классических полупроводниках, таких, как кремний и германий.

Примерно в течение последних сорока лет полупроводники стали рассматриваться как особый класс веществ. Значительные успехи были достигнуты, в первую очередь, в области их теории.

Явления переноса носителей заряда и термоэлектрические процессы были объяснены качественно. Законы "первичного" фотоэлектрического эффекта, который мы теперь называем фотоионизацией, были проверены экспериментально Полем и Гудденом, использовавшими диэлектрические кристаллы, включая природный алмаз. Было показано, что имеет место точное соответствие между этими явлениями и представлениями Эйнштейна о фотоионизации изолированных атомов. Однако многие из "вторичных" эффектов, таких, как влияние химических примесей на фотопроводимость, долго оставались непредсказуемыми.

Дальнейшая ступень развития была следствием требований военной технологии и привела к достижению современного уровня применений полупроводников аналогично успехам в строении самолетов, достигнутым во время Первой мировой войны. После изобретения и дальнейшего развития радиолокации, большие усилия были приложены к усовершенствованию твердотельных детекторов слабых сигналов электромагнитного излучения. Было обнаружено, что превосходные приборы могли быть созданы на основе применения монокристаллов германия. Германий (Ge) — малораспространенный элемент периодической системы Менделеева — кристаллизуется, образуя очень простую систему, родственную алмазу и кремнию.

Чистый германий очень дорог, однако почти совершенные кристаллы Ge удается вырастить в вакууме при температуре около 960 °С. В России, вероятно, я был одним из первых, построивших установку для выращивания монокристаллов германия. До этого они были выращены коллегами из лабораторий Белла (Bell) в США. Вскоре германий стал основным материалом, применявшимся для создания транзисторов, диодов и фотоэлектрических устройств. Однако вследствие своих основных свойств, определяемых так называемой "шириной запрещенной полосы энергий", близкой к 0,7 эВ, область температур, в которой германиевые приборы могут быть использованы, ограничена значением примерно +30 °С: при более высоких температурах применять их практически невозможно. Это обстоятельство стимулировало поиски других полупроводников, из которых наилучшим вскоре оказался кремний. Технология выращивания больших монокристаллов кремния очень сложна. Тем не менее в настоящее время (1994 г.) удается получать огромные цилиндрические монокристаллы диаметром до 150 мм и длиной более полуметра. Эти монокристаллы представляют собой наиболее совершенный и чистый материал, создаваемый с использованием весьма совершенной технологии. Однако для их резки на тонкие пластины, на которых изготавливают интегральные схемы, в частности, для компьютеров, приходится применять очень дорогую технику (диски с кристаллитами алмаза), так как монокристаллы кремния очень тверды.

Альтернатива в подходе к технологии кремниевых приборов представляет собой крайне интересную об-

ласть полупроводниковой технологии. Ее основой является создание так называемых эпитаксиальных слоев полупроводников. Весьма вероятно, что через десять или двадцать лет необходимость в выращивании огромных кристаллов кремния и в их резке на тонкие пластины исчезнет и будет использоваться метод эпитаксиальной технологии.

Кремний как основной полупроводниковый материал

Кремний как бы сотворен природой, чтобы стать основой современной твердотельной электроники, подобно тому как железо давно стало основой техники создания инструментов, средств транспорта и оружия. Подобно железу, кремний не существует в природе в свободном состоянии: люди должны затрачивать большие усилия и проявлять искусство для его получения. Однако кристаллы кремния после того, как они выращены, естественным образом "обрастают" тонким слоем стеклообразного окисла и остаются стабильными в широкой области температур — до 600 °С. Уже в середине 50-х годов кремниевые приборы по своим параметрам превосходили германиевые. В настоящее время более 98 % "единиц" приборов полупроводниковой электроники изготавливают на основе кремния.

Размеры полупроводниковых приборов и проблема их миниатюризации

Со времени изобретения транзистора в 1948 г. стало очевидным, что размер полупроводникового диода или триода может быть в сотни или тысячи раз меньше, чем размер вакуумного прибора, используемого для тех же целей. Помимо этого в полупроводниковом приборе нет горячего катода, и выделяемая при его работе тепловая энергия невелика. Специалисты помнят огромные компьютеры (вычислительные машины, как их называли в начале 50-х годов), в которых использовали тысячи вакуумных ламп, что требовало мощных вентиляционных установок для отвода тепла. Первые 20 лет (начиная с 50-х годов) развития производства полупроводниковых приборов устройства на их основе, такие, например, как радиоприемники, включали десятки отдельных транзисторов и диодов, которые соединяли проволочками. Производство таких приборов занимало много времени и включало примитивные операции, выполняемые вручную. На автора, посетившего радиотехнический завод в Японии в 1962 г., произвел сильное впечатление цех, в котором сотни девушек сидели часами, глядя в бинокулярный микроскоп и действуя вручную микроманипулятором. Еще в те времена возникла идея создания планарной двумерной технологии, которая вскоре была реализована. Такая технология включала сложные и дорогие последовательные процессы, т.е. линии, в какой-то мере подобные конвейерам, используемым в производстве автомобилей. Полное число операций, необходимых для создания "интегральной схемы" на небольшой пластине монокристаллического кремния (chip — это слово ныне используется и в России) площадью около квадратного сантиметра и толщиной около трех десятых миллиметра, превышает 200. Созданные таким образом интегральные схемы (IC), представляющие собой "сердце" персонального компьютера, может включать сотни тысяч "активных элементов", т.е. транзисторов, диодов и конденсаторов.

Новые тенденции в технологии твердотельной электроники: использование ускоренных ионов и электронов

Одна из главных проблем в технологии интегральных схем состоит в уменьшении размеров активных элементов и соответствующем увеличении числа электронов на стандартной пластинке (chip). Существует несколько путей осуществления этого, и один из них состоит в использовании пучков ускоренных ионов необходимых химических примесей. Первоначальный метод локального введения примесей (легирование) включал маскирование, т.е. создание на поверхности полупроводника необходимой матрицы из защитной пленки, оставлявшей открытыми участки, которые надо легировать, последующую термическую диффузию и удаление маски путем химического травления. Подобные операции, которые получили техническое развитие и используются в настоящее время, сложны и не всегда воспроизводимы в необходимой степени.

Было предложено и показано экспериментально, что чистый пучок ускоренных ионов может быть применен для локального введения необходимых примесей в приповерхностный слой полупроводника или иного материала.

Первоначальное отношение технологов к такой методике было очень осторожным и часто скептическим в связи с неизбежным при внедрении ионов радиационным нарушением структуры материала. К счастью, вскоре было обнаружено, что в кремнии, германии и в определенной степени в других полупроводниковых материалах исходная совершенная структура кристалла может быть восстановлена, и метод ионной имплантации, как его называют теперь, эффективен и практически полезен. В настоящее время в странах с высокоразвитой электронной промышленностью используются тысячи специально приспособленных ускорителей ионов, которые обычно называют "имплантерами".

Наряду с использованием ускоренных ионов существует интересная область применения импульсов лазерного излучения и электронных пучков для модификации свойств полупроводников.

Потребление энергии полупроводниковыми приборами

Одна из главных особенностей современных полупроводниковых устройств состоит в высокой эффективности транзисторов и других приборов при чрезвычайно малом расходе энергии, необходимой для их применения. Электронные часы, малогабаритный радиоприемник или калькулятор действуют около года, используя миниатюрную химическую батарею или солнечную батарею. И лишь менее половины необходимой энергии для их работы передается в окружающее пространство.

Современные применения солнечных батарей и тенденции их развития в будущем

Первоначальные "фотовольтаические" устройства, основанные на использовании внутренней фотоионизации в неметаллических веществах, были созданы и с пользой применены задолго до возникновения современной технологии полупроводниковых, в первую очередь, кремниевых приборов. Эти приборы на основе селена, а также сульфида кадмия CdS были построены эмпирически и применялись с успехом. Однако их энергетическая эффек-

тивность не превышала 0,5 %. Решающий шаг в гелиоэнергетике был сделан в середине 50-х годов в США Дж. Пирсоном и его коллегами, применившими монокристаллы кремния с $p-n$ -переходами. Согласно предсказанию теоретиков, предельная эффективность преобразования энергии излучения Солнца в электрическую очень велика и может превышать 30 %. Солнечные батареи на основе кремния были созданы в Физическом институте им. П.Н. Лебедева в Москве и усовершенствованы в Технологическом центре вблизи Москвы.

Уже на втором из искусственных спутников были установлены экспериментальные кремниевые солнечные батареи, а в настоящее время такие источники электрического питания неизменно применяются в космических исследованиях. Первоначальная технология их изготовления включала резку больших монокристаллов на тонкие пластины, что сопровождалось большими затратами средств.

Несколько лет тому назад альтернативный способ создания кремниевых покрытий большой площади был найден в Великобритании Спиром и Ле Комбером, синтезировавшими аморфный кремний из газовой плазмы, содержавшей вещества, включавшие этот элемент. Аморфный кремний, как и кристаллический, имеет тетраэдрические связи между атомами, но в нем отсутствует "дальний порядок", характеризующий кристаллические вещества. Большая часть калькуляторов, в том числе используемых продавцами в магазинах, где торгуют колбасой и прочими обычными продуктами, действует на основе солнечных батарей на аморфном кремнии. Электронная промышленность Японии, быстро освоившая технологию аморфного кремния, добилась в этой области очень больших успехов.

В настоящее время кремниевые солнечные батареи используются очень широко, это стимулирует здоровый энтузиазм среди тех, кто верит в дальнейшее расширение области их применений. Однако вряд ли можно считать, что в будущем солнечные батареи смогут конкурировать с двигателями внутреннего сгорания автомобилей или с опасными ядерными реакторами, используемыми для генерации электроэнергии.

Люминесценция полупроводников

Замечательное явление люминесценции, т.е. "атермического" испускания света, было замечено людьми с незапамятных времен. В отличие от света, излучаемого горящим деревом или при извержении вулкана, существует свет совершенно иных источников. Можно представить себе, что свет молний, которые метал Зевс, был следствием люминесценции газовой плазмы, возбужденной мощными электрическими токами в атмосфере Земли. Возвращаясь к явлениям природы, не связанным с действиями богов, можно упомянуть хорошо известную хемилюминесценцию разлагающейся древесины или люминесцентные органы светлячков, которыми восхищаются люди даже в нашей холодной стране — России, и свечение, испускаемое некоторыми морскими животными, которое многим, вероятно, посчастливилось наблюдать в Черном море вблизи берегов Крыма. В настоящее время люминесценция, т.е. "нетепловое" испускание света возбужденными полупроводниками, объяснено в деталях современными теоретическими представлениями. Это явление в случае полупроводников инициируется генерацией "избыточных", т.е. термо-

динамически неравновесных носителей, аналогичных неравновесным электронам в вакууме.

Для того чтобы начать такой процесс, можно использовать ионизирующую радиацию: например, пучки ускоренных электронов, рентгеновское излучение или так называемую инжекцию неравновесных носителей заряда сквозь барьер в полупроводниковой структуре.

На всех телевизорах в настоящее время используются явления возбуждения быстрыми электронами тонких слоев полупроводника, тщательно подобранных и созданных с использованием дорогой и сложной технологии с тем, чтобы добиться возникновения цветных изображений на экране. В настоящее время вероятно постепенный переход к плоским электролюминесцентным экранам, не требующим применения электронных пучков в вакууме.

Детекторы частиц и дозиметры

В течение долгого времени природу и энергию "жестких" ядерных излучений, таких, как альфа-частицы, быстрые электроны и гамма-кванты, определяли и измеряли с помощью устройств, в какой-то мере родственных вакуумным радиолампам. Эти приборы были эффективными и надежными, но отличались большим рабочим объемом и требовали высоких разностей потенциала (напряжений) для своей работы. Идея создания твердотельной ионизационной камеры была осуществлена, насколько мне известно, Ван Хеерденом в середине 40-х годов; он использовал кристаллы природного алмаза, представляющие собой в равновесных условиях почти совершенный изолятор. Ионизация частицами или фотонами высокой энергии приводит к возникновению большого числа носителей заряда, и импульс электрического тока проходит сквозь кристалл, если к нему приложено электрическое поле. Прибор Ван Хеердена был первой твердотельной ионизационной камерой. Ее рабочий объем не превышал одной тысячной объема аналогичной вакуумной ионизационной камеры. В настоящее время кремний, германий и другие полупроводники систематически применяются как рабочие материалы в разнообразных типах детекторов частиц и фотонов больших энергий и в дозиметрах.

Главные трудности, типичные для применений полупроводников в технике

Как уже было указано ранее, одной из привлекательных сторон, позволивших создать транзисторы, оказалась сравнительно простая техника выращивания почти совершенных кристаллов германия. Даже в случае крем-

ния эта техника оказалась во много раз более сложной и дорогой, но главные трудности удалось преодолеть. Технология ближайших аналогов кремния, в первую очередь — алмазоподобных полупроводников, которые были синтезированы Хилсумом в Великобритании и Наследовым и Горюновой в России, значительно более сложна. Большие усилия и затраты были приложены к синтезу так называемых соединений класса A_3B_5 , в первую очередь к арсениду галлия GaAs.

Как этого можно было ожидать, наличие многих типов точечных дефектов и возможность фазовых переходов сильно влияют на совершенство структуры кристаллов, и пока технические возможности использования полупроводниковых соединений остаются значительно ограниченными в сравнении с широкой областью технологии приборов, основанных на применении кремния.

Другие трудности и ограничения будущих областей практического использования полупроводников обусловлены, в первую очередь, метастабильностью большинства полупроводниковых устройств. Известно, что потребители ожидают от применяемых ими приборов времени использования не менее десяти лет. Это обстоятельство во многих случаях оказывалось решающим. В связи с этим фактором многие из привлекательных линий развития физики и технологии полупроводников постепенно затухли.

Полупроводники, как и элементарные клетки живых организмов, весьма чувствительны к воздействию "жестких" излучений, таких, как гамма-излучения или нейтроны. Подобные явления систематически изучаются, и их воздействие на полупроводники весьма существенно. Основные процессы, приводящие к возникновению "радиационных нарушений" в твердых телах, в наше время часто удается описать количественно. В итоге этого часто удается предсказать поведение полупроводникового устройства в зависимости от условий воздействия радиации.

Благодарности

Автор выражает благодарность профессору Афинского университета П.К. Эфимиу, предложившей сотрудничество греческих и российских специалистов в области физики твердого тела в 1978 г., а также академику К. Алексопулосу, предложившему мне трудную тему доклада на общем собрании Афинской академии наук в октябре 1994 г.

SEMICONDUCTORS IN THE MODERN WORLD

V.S. Vavilov

*P.N. Lebedev Institute of Physics, Russian Academy of Sciences
Leninskii prosp. 53, 117924 Moscow, Russia
Tel. (7-095) 135-05 51
Fax (7-095) 138-22 51
E-mail: dravin@sci.fian.msk.su*

Some of the most important achievements in the field of solid state electronics and energetics are presented in condensed form.

PACS numbers: 85.30.-z, 72.80.Cw, 72.80.Ey

Received 4 January 1994