

ПРОИЗВОДСТВО ПРОЦЕССОРОВ: ОТ КРЕМНИЕВОЙ ПЛАСТИНЫ ДО ЛОГИКИ

Биюмен Е.А., студент, e-mail: yauheni_biyumen@internet.ru

Макареня Е.А., студент, e-mail: makarenaekaterina@gmail.com

2025

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Ключевые слова: кремний, полупроводники, р-п переход, транзистор, фотолитография, полусумматор, логические элементы.

Аннотация: В статье рассматриваются физические основы и технологические аспекты производства микропроцессоров на базе кремния. Описаны процессы формирования транзисторов, их роль в логических элементах и способы организации вычислительной логики. В практической части приведён пример построения бинарного сумматора на основе дискретных транзисторов и резисторов, демонстрирующий физические принципы работы логических схем.

Современные процессоры, пожалуй, являются одними из самых сложных и, в то же время, важных инженерных устройств, сочетающих в себе достижения физики, материаловедения и цифровой логики. Их работа – это сплетение физических принципов полупроводников и технологии создания мельчайших элементов на кремниевой основе. Процесс производства интегральных схем включает сложные этапы, такие как фотолитография, травление, легирование и металлизация.

Кремний является главным материалом для производства микропроцессоров благодаря его полупроводниковым свойствам. Согласно зонной теории твёрдых тел, кремний имеет запрещённую зону шириной 1,12 эВ, что позволяет ему работать как полупроводник при комнатной температуре (до 150 °C) [1]. Такая ширина является балансом между проводимостью и изоляционными свойствами. Зонная структура кремния представлена на рисунке 1 [2].

Создание кремниевых пластин начинается с выращивания монокристаллов методом Чохральского. Процесс включает погружение затравочного кристалла в расплав кремния (в условиях инертного газа или вакуума) и его медленное вытягивание с контролируемым вращением [3]. В результате образуется цилиндрический монокристалл с геометрически правильной кристаллической решёткой, обеспечивающей однородность структуры.

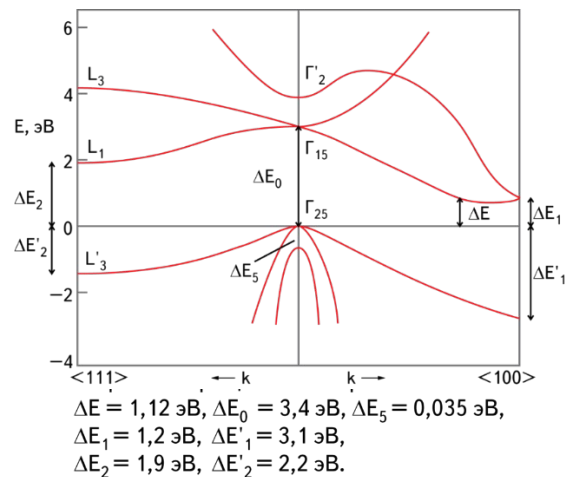


Рисунок 1 – Схематическое изображение зонной структуры кремния

Полученные монокристаллы разрезают на тонкие пластины толщиной в несколько сотен микрон, которые затем проходят этапы шлифовки и полировки до зеркального состояния. Это необходимо для минимизации дефектов, которые могут повлиять на работу транзисторов.

Производство интегральных микросхем включает многократное повторение слоёв и обработку поверхности кремниевой пластины, далее приведены одни из основных этапов:

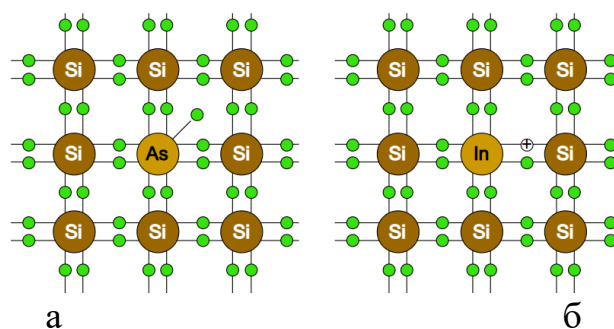
1 Фотолитография – использование света для переноса маски на фоторезистор. С учётом дифракционных эффектов и длины волны света обеспечивается формирование элементов размером до нескольких нанометров (чем меньше длина волны, тем более точные и мелкие структуры можно создать).

2 Травление – удаление слоёв с поверхности пластины с помощью химического или плазменного (ионизирующий газ) методов.

3 Легирование – введение примесей методом ионной имплантации для создания областей p- и n-типа с нужными характеристиками. В свою очередь, управлять типом проводимости кремния позволяет внесение различных примесей (рисунок 2) [4]:

- введение донорных примесей (фосфор, мышьяк) создаёт избыток свободных электронов (проводимость n-типа);

- введение акцепторных примесей (бор, индий) создаёт избыток дыр, положительно заряженных квазичастиц, (проводимость p-типа).



а – n-тип с примесным добавлением мышьяка (As);
б – p-тип с примесным добавлением индия (In)

Рисунок 2 – Кристаллические решётки p- и n-типа

4 Металлизация – нанесение металлических слоёв (медь, алюминий и так далее) для формирования соединений между полученными транзисторами.

В условиях быстрого уменьшения размеров транзисторов, современные производители процессоров сталкиваются с фундаментальными ограничениями. Исторически, развитие в микроэлектронике соответствовало закону Мура, согласно которому число транзисторов на микросхеме удваивается каждые два года [5]. Однако с приближением размеров транзисторов к около нано-метровому размеру возникают серьёзные проблемы.

При уменьшении размеров транзисторов, электроны начинают проявлять квантовые эффекты, один из которых туннелирование через барьеры. Это явление напрямую связано с волновой природой электронов, в соответствии с которой, вероятность нахождения электрона в запрещённой зоне увеличивается при уменьшении размера барьера. В результате возникает утечка тока, что приводит к нарушению работы транзисторов и уменьшению энергоэффективности. Также высокая плотность компонентов на кристалле усиливает тепловыделение, из-за чего требуется разработка и применение новых подходов к охлаждению.

В то же время, для создания структур размером менее 5 нм требуется применение передовых технологий, таких как экстремальная ультрафиолетовая литография (EUV), при которой используется длина волны около 13,5 нм. Это позволяет обойти дифракционные ограничения традиционной фотолитографии, но при этом сопровождается значительными техническими и экономическими сложностями.

Кроме того, кремний приближается к своим физическим ограничениям, таким как уменьшение подвижности носителей заряда в условиях экстремально малых размеров. Эта проблема подталкивает к изучению альтернативных материалов, таких как графен, который

обладает высокой подвижностью электронов, и молибденит, который позволяет создавать транзисторы с меньшим энергопотреблением [6, 7]. Одним из перспективных направлений также является переход к трёхмерным структурам, которые увеличивают плотность компонентов без необходимости дальнейшего уменьшения их размеров.

Важно также упомянуть принцип работы транзистора. В основе их работы лежит р-п переход. В современной логике используются полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET), благодаря их энергоэффективности и размерам, однако для простоты понимания и сборки сумматора воспользуемся биполярными транзисторами, например BC547C. Далее рассмотрим работу n-p-n биполярного транзистора:

- закрытое состояние (логический 0): при отсутствии тока на базе ток от коллектора к эмиттеру не проходит, так как барьерная зона р-п перехода препятствует движению основных носителей заряда;

- открытое состояние (логический 1): под воздействием тока на базе происходит инжекция электронов, которая уменьшает ширину барьерной зоны, что позволяет току протекать между коллектором и эмиттером.

Таким образом, транзистор позволяет управлять относительно большим электрическим током с помощью малых сигналов, что лежит в основе работы цифровых устройств.

В качестве практической демонстрации принципов работы транзисторов, соберём полусумматор, выполняющий сложение двух однокбитных чисел (А и В). Схема такого элемента представлена на рисунке 3. Полусумматор состоит из двух логических элементов:

- исключающее ИЛИ (XOR): формирует бит суммы: $S = A \text{ XOR } B$;
- логическое И (AND): формирует бит переноса: $C = A \text{ AND } B$.

Схема работы:

1 На входы подаются два бита: А и В. Они принимают значения логических «1» (на базу транзисторов VT1 или VT2 подается 5 В) или «0» (на базу транзисторов подается 0 В).

2 Логическое XOR даёт выходной бит суммы (Sum) S. В случае, когда сумма равна логической «1» (высокий потенциал, около 2,3 В), загорается светодиод (Sum), в противном случае нет.

3 Логическое AND определяет бит переноса (Carry) C. Если результатом операции в предыдущем бите происходит перенос (и А, и В равны «1») загорается светодиод Carry.

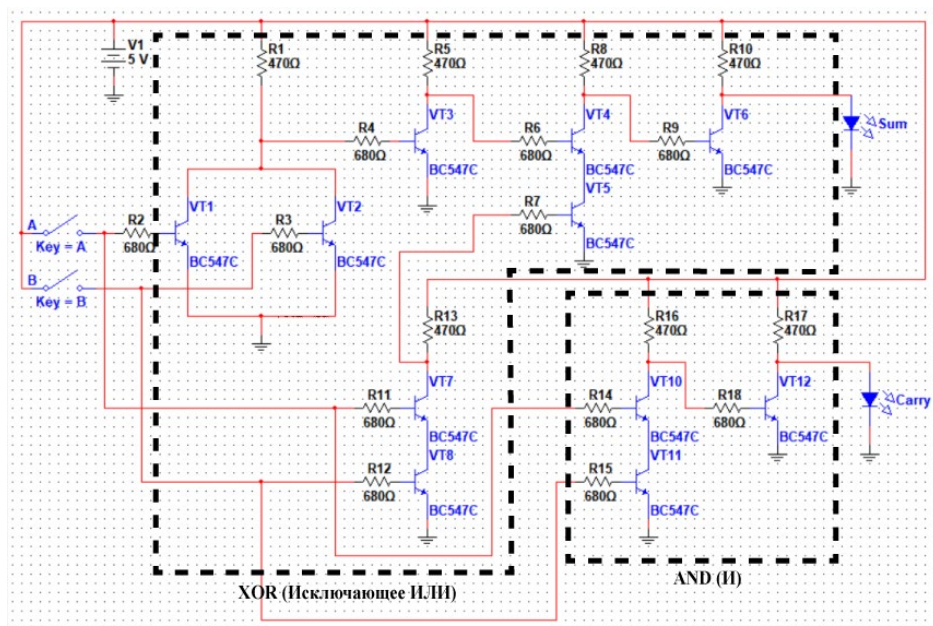


Рисунок 3 – Принципиальная схема полусумматора

Физическая реализация сумматора на транзисторах демонстрирует принцип управления токами и взаимодействие логических состояний (разных уровней потенциалов).

Производство микропроцессоров представляет собой сложный процесс, основанный на законах физики твёрдого тела и современных технологиях обработки материалов. Кремний, благодаря своим полупроводниковым свойствам, является основой всех современных электронных устройств. Формирование транзисторов, создание логических элементов и организация вычислительной логики демонстрируют симбиоз физики, материаловедения и инженерии.

Практическая реализация полусумматора позволяет наглядно продемонстрировать принципы работы транзисторов и логических схем, что способствует более глубокому пониманию процессов, лежащих в основе современных цифровых технологий.

Список использованных источников

1. Конспект лекций КиОЭ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://studfile.net/preview/9085612/page:6/>. Дата доступа: 10.03.2024.
2. Кремний [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%BD%D0%B8%D0%B9>. Дата доступа: 10.03.2024.
3. Метод Чохральского [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://bigenc.ru/c/metod-chokhral-skogo-fa273d>. Дата доступа: 10.03.2024.
4. Лекция 9 Электроника [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://studfile.net/preview/15936078/>. Дата доступа: 10.03.2024.

5. Что такое Закон Мура и как он работает теперь? Разбор [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://habr.com/ru/companies/droider/articles/568806/>. Дата доступа: 10.03.2024.

6. Процессоры будущего могут стать в 10 раз быстрее благодаря графену [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.techinsider.ru/gadgets/1567377-processor-budushchego-mogut-stat-v-10-raz-bystree-blagodarya-grafenu//>. Дата доступа: 10.03.2024.

7. Китайские ученые создали 32-битный процессор толщиной в одну молекулу [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://hightech.fm/2025/04/04/processor-molybdenum?is_ajax=1. Дата доступа: 05.04.2024.