

## МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОНИКИ

**Введение** Анализ физических процессов, происходящих в полупроводниковых структурах возможен только с использованием средств вычислительно техники из-за многомерной природы переноса заряда в них. Поэтому стало важным построение соответствующих моделей расчета. Одним из направлений выделяется построение макроскопических моделей элементов на основе фундаментальной системы уравнений физики полупроводников.

Для описания физических процессов в полупроводниковых структурах кремниевых интегральных схем используются уравнения непрерывности для дырок и электронов, уравнение Пуассона для электростатического потенциала, уравнение Максвелла для полной плотности тока, уравнение для плотностей электронного и дырочного тока.

### **Постановка задачи численного моделирования элементов интегральных схем**

Основным этапом первых двух уровней моделирования является математическая формулировка задачи. Эта процедура включает вывод уравнений, описывающих основные физические процессы внутри структуры прибора, и граничных условий. Последние представляют собой математические зависимости, характеризующие процессы, происходящие на поверхности структуры. Эти зависимости имеют большое значение для моделирования, так как они отражают взаимодействие прибора с окружающей средой. Формулировке математической модели объекта предшествует ранжирование учитываемых факторов, процессов и эффектов и выбор приближений, от которых зависит сложность и эффективность модели. При этом выбирают конфигурацию и геометрические размеры модельной области, аппроксимируют распределения концентрации легирующих примесей в ней, обосновывают пренебрежения второстепенными физическими процессами и эффектами. На нижнем структурно-физическом уровне объект моделирования, в общем случае являющийся трёхмерной полупроводниковой структурой, представляют множеством плоских сечений, нормальных и параллельных плоскости рабочей поверхности БИС.

Множество сечений для нормирования модельных объектов выбирают на основании качественного анализа физических процессов в интегральной структуре элементов БИС. Эти сечения должны совпадать с плоскостями, в которых развиваются основные физические процессы, характеризующие работу прибора. Число сечений зависит от требуемой детализации учитываемых факторов, процессов и эффектов. Конфигурации моделей областей определяют в пределах этих сечений.

Физико-топологические модели должны:

- 1) просто и гибко учитывать топологию элементов БИС, в частности функционально-интегрированных (ФИЭ);
- 2) учитывать в интегральной форме наиболее существенные физические процессы, определяющие функционирование элементов БИС;
- 3) допускать стыковку по входам и выходам с электрическими эквивалентными системами, имитирующими условия работы элементов в составе БИС;

4) предполагать возможность моделирования фрагментов БИС с различной степенью приближения. Остановимся на каждом из перечисленных требований более подробно. Из первого требования следует, что модель должна быть в общем случае двумерной как для токов основных, так и неосновных носителей заряда в полупроводнике. При этом получается слишком громоздкая для практического проектирования модель.

#### **Теоретические модели плотности квантовых состояний**

При численном моделировании полупроводниковых приборов при наличии примеси, как правило, во всём диапазоне концентрации примеси используют модели, объединяющие (по принципу суперпозиции и некоторым другим правилам) модели Моргана [1] (для плотности квантовых состояний примесной зоны), Бонч-Бруевича [2] и Кэйна [3] (для случаев очень больших концентраций примеси).

Уравнения для плотности тока накладывают наиболее сильные ограничения на адекватность макроскопических моделей, поэтому и должны анализироваться в первую очередь.

В настоящее время разработаны более строгие теоретические подходы к расчёту сужения ширины запрещённой зоны. Несмотря на перспективность учёта сужения ширины запрещённой зоны с использованием теоретических подходов, наиболее целесообразным следует признать учёт эффектов сильного легирования при численном моделировании элементов ИС по эмпирическим моделям.

Альтернативный подход к учёту сужения ширины запрещённой зоны вследствие сильного легирования при моделировании элементов ИС может быть проведён с использованием экспериментальных данных. В настоящее время существует достаточно много методик определения  $\Delta E$ . По способу проведения измерений: результаты по оптическому поглощению; результаты по исследованию фотолюминесценции; электрические измерения; рентгеновские измерения.

Наиболее часто при численном моделировании привлекаются эмпирические модели работ Вольфсона-Субашиева, Ланьона-Тафта, Слотбума-де Грааффа [4].

#### **Модели подвижности**

Получение теоретических моделей подвижности осуществляется на основе вычисления времени релаксации с использованием классических или квантомеханических подходов. Эти модели, хотя и дают качественно правильные результаты, количественные значения далеки от экспериментальных. Иногда отличия имеют место и в степенных зависимостях от различных факторов, поэтому при численном моделировании используют эмпирические модели.

В настоящее время разработаны эмпирические модели, учитывающие влияние уровня легирования, поля, концентрацию подвижных носителей заряда, явления на поверхности, температуру. Наиболее часто при численном моделировании используется модель Коугей-Томаса [5].

#### **Модели процессов рекомбинации-генерации**

При моделировании рекомбинации необходимо учитывать 2 возможные разновидности рекомбинации:

1) рекомбинация зона-зона, при которой избыточные электроны зоны проводимости непосредственно переходят в валентную зону, и там происходит исчезновение пары свободных носителей заряда;

2) рекомбинация через локальные центры, находящиеся в запрещённой зоне проводника.

Численное моделирование элементов кремниевых ИС, как правило, производится в соответствии с общефизической картиной рекомбинации, либо с помощью эффективного подхода.

Во всём диапазоне концентрации примеси в кремнии часто применяется эффективный подход к учёту различных видов и механизмов рекомбинации с использованием только модели Шокли-Рида-Холла.

#### **Макроскопическая модель диэлектрика**

Т.к. в элементах кремниевых ИС всегда существуют области полупроводника, покрытые диэлектриком, то макроскопическую модель полупроводника необходимо дополнить макроскопической моделью диэлектрика. Т.к. модель диэлектрика более проста, чем модель полупроводника, для диэлектрика может использоваться фундаментальная система уравнений в предположении  $n_i = p_i = 0$ .

#### **Граничные условия**

Для полной физико-математической постановки задачи необходимо определить граничные условия, являющиеся математическим описанием взаимодействия прибора с внешней средой либо неоднородностей материала.

Физические принципы, лежащие в основе получения краевых условий:

1) в случае отсутствия потока заряженных частиц через поверхность полный ток равен нулю;

2) если в приборе имеются области с различной диэлектрической проницаемостью, контактирующие между собой, то граничные условия определяются на основе закона Гаусса-Остроградского;

3) на омических контактах предполагается неограниченная скорость поверхностной рекомбинации;

4) выходной ток определяется интегралом по площади омического контакта.

Физические принципы, лежащие в основе приведённых граничных условий, носят фундаментальный характер в случае отсутствия активного взаимодействия прибора с внешней средой, т.е. не могут накладывать существенных ограничений на справедливость рассматриваемой макроскопической модели.

#### **Исходные данные**

Для полной завершенности постановки задачи в каждом конкретном случае необходимо задание информации о структуре элемента. Данная информация включает 3 группы параметров:

1) технологические (геометрические размеры структуры, профиль легирования)

2) электрофизические (подвижность, параметры эффектов ВУЛ, параметры процессов генерации-рекомбинации и свойств поверхностей раздела)

3) управляющие воздействия.

Технологические параметры могут быть определены на основе экспериментальных значений, расчётным путём или гибридным способом.

Электрофизические параметры могут быть измерены, однако такой подход требует разработки специальных тестовых структур и соответствующей аппаратуры.

К параметрам управляющих воздействий относятся: напряжения на контактах (граничные условия); токи через контакты (граничные условия); некоторые другие параметры в случае учёта оптической генерации, ядерной и космической радиации.