

создан абстрактный класс Node, описывающий общие свойства и поведение узлов. В нем также определены атрибуты, обеспечивающие возможность блокировки-разблокировки выполнения кода узла-потока. Конкретные типы узлов поддерживаются классами, производными от Node и описывающими их специфические свойства и поведение. Это, например, такие классы как: Generate, который реализует работу источников заявок, функционирующих в групповом или одиночном режиме в соответствии с заданными законами, вероятностными распределениями; класс Facility, который обеспечивает функциональность обслуживающих узлов, поддерживает управление фазами работы одно- и многоканальных устройств; класс Storage, который обеспечивает функциональность обслуживающих узлов, обладающих емкостью; класс Advance, реализующий управление фазой задержки заявки, время которой формируется по заданному закону; набор классов типа Test, Gate и др., производных от класса RouteControl и обеспечивающих переключение маршрутов перемещения заявок в зависимости от истинности заданных условий, формируемых на базе атрибутов заявок, состояний узлов, сети, очередей; класс Transfer, обеспечивающий поддержку действий по выбору маршрутов движения заявок в соответствии с заданным распределением вероятностей и другие классы. Для управления активизацией узлов-потоков использовался специальный класс Control. В цикле моделирования каждому узлу предоставляется возможность произвести обработку пришедших заявок. При передаче управления от одних узлов к другим для синхронизации действий используются семафоры. Для учета ситуации циклической передачи управления ведется стек вызовов.

Таким образом, в работе представлены результаты организации имитационного моделирования сетей с использованием визуальных описаний, реализованного на базе иерархии пользовательских классов и средств естественного распараллеливания ОС. Использование рассмотренных в работе графических описаний позволяет с большей наглядностью разрабатывать и верифицировать типовые модели на понятийном уровне.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Советов, Б.Я. Моделирование систем / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высшая школа, 2001. – 430 с.
2. Муравьев, Г.Л. Подход к описанию q-схем, согласованный с системой моделирования GPSS // Материалы VII международной конференции: Наука и образование в условиях социально-экономической трансформации общества / Г.Л. Муравьев, В.И. Хвещук. – Брест, 2004. – Т.1. – С. 73-75.
3. Основы теории вычислительных систем / Под ред. С.А. Майорова. – М.: Высш. школа, 1978.
4. Рьжиков, Ю.И. Имитационное моделирование. Теория и технологии / Ю.И. Рьжиков. – СПб.: КОРОНА, 2004. – 320 с.
5. Максимей, И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ / И.В. Максимей. – М.: Радио и связь, 1988. – 232 с.
6. Воеводин, В.В. Параллельные вычисления / В.В. Воеводин, Вл.В. Воеводин. – СПб.: BHV-Петербург, 2002. – 609 с.

УДК 551.510.7:645.625.162.4

Швай Д.Н.

Научный руководитель: ст. преподаватель Янусик И.С.

ФОТОРЕЗИСТОР

Зависимость фотопроводимости ряда полупроводников от освещенности используется в фоторезисторах, получивших широкое практическое применение. *Фоторезистор* – это полупроводниковый резистор, действие которого основано на фоторезистивном

эффекте. *Фоторезистивный эффект* – это изменение электрического сопротивления полупроводника, обусловленное исключительно действием оптического излучения и не связанное с его нагреванием. Для возникновения фоторезистивного эффекта необходимо, чтобы в полупроводнике происходило либо собственное поглощение оптического излучения или фотонов с образованием новых пар носителей заряда, либо примесное поглощение с образованием носителей одного знака при возбуждении одноптипных дефектов. В результате увеличения концентрации носителей заряда уменьшается сопротивление полупроводника.

При облучении полупроводника наряду с генерацией неравновесных носителей заряда происходит и обратный процесс – рекомбинация. Через некоторое время после начала облучения устанавливается динамическое равновесие между генерацией и рекомбинацией. При этом избыточная концентрация, например, электронов

$$\Delta n = (1-R)\eta N_{\Phi} \tau_n, \quad (1)$$

где R – коэффициент отражения фотонов от полупроводника; α – показатель поглощения; η – *квантовая эффективность генерации*, т.е. число возникающих пар носителей при собственном поглощении (или число носителей при примесном поглощении), отнесённое к числу поглощённых фотонов; N_{Φ} – число фотонов, падающих на единичную поверхность полупроводника в единицу времени (оно может быть определено как мощность падающего на единичную поверхность излучения, отнесённое к энергии фотона $h\nu$); τ_n – время жизни неравновесных носителей заряда.

Фоторезистор представляет собой пластину полупроводника (монокристаллическую или в виде тонкой плёнки), на противоположных концах которой созданы омические контакты (рис. 1).

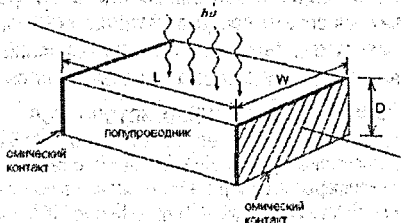


Рисунок 1 – Устройство фоторезистора

Основной частью конструкции фоторезистора является полупроводниковый фоточувствительный слой, который может быть выполнен в виде монокристаллической или поликристаллической пластинки полупроводника или в виде поликристаллической плёнки полупроводника, нанесённой на диэлектрическую подложку. На поверхность фоточувствительного слоя наносят металлические электроды. Иногда эти электроды наносят непосредственно на диэлектрическую подложку перед осаждением полупроводникового слоя [1].

Поверхность полупроводникового фоточувствительного слоя, расположенную между электродами, называют *рабочей площадкой*. Фоторезисторы делают с рабочими площадками прямоугольной формы, в виде меандра или в виде кольца. Площадь рабочих площадок различных фоторезисторов составляет обычно от десяти долей до десятков квадратных миллиметров. Исходя из площади рабочей площадки, можно правильно выбрать размер светового пучка, оценить световой поток, при котором должен работать фоторезистор, и т.д. При эксплуатации фоторезистора рекомендуется его рабочую пло-

щадку засвечивать полностью, так как при этом эффект изменения сопротивления фоторезистора максимален. Подложку с нанесённым на неё полупроводниковым фоточувствительным слоем или пластинку полупроводника помещают в пластмассовый или металлический корпус.

При падении излучения на поверхность фоторезистора в последнем генерируются носители вследствие возбуждения либо междузонных переходов (собственное возбуждение), либо переходов с участием энергетических уровней в запрещённой зоне (примесное возбуждение), что приводит к увеличению проводимости.

Проводимость собственных фоторезисторов описывается формулой $\sigma = q(\mu_n n + \mu_p p)$, и увеличение проводимости под действием освещения в основном связано с увеличением числа носителей. Длинноволновая граница фотопроводимости в этом случае определяется из соотношения [3]

$$\lambda_0 = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g (\text{эВ})} \quad (1)$$

где λ_0 – длина волны, соответствующая ширине запрещённой зоны E_g .

Излучение с длинами волн, меньшими λ_0 , поглощается в полупроводнике с образованием электронно-дырочных пар. В примесном фоторезисторе фотовозбуждение может происходить между краем зоны и энергетическим уровнем в запрещённой зоне. Фотопроводимость может возникнуть в результате поглощения фотонов с энергией, которая равна или превышает энергию, отделяющую примесный уровень от зоны проводимости или валентной зоны. При этом длинноволновая граница фотопроводимости определяется глубиной залегания примесного уровня запрещённой зоне.

Работа фотодетекторов вообще и фоторезисторов в частности характеризуется тремя параметрами:

- 1) квантовой эффективностью или усилением;
- 2) временем фотоответа;
- 3) чувствительностью (обнаружительной способностью).

Рассмотрим процессы, которые происходят в фоторезисторе при падении фотонов.

Пусть в какой-то начальный момент времени $t = 0$ число носителей, возникших в единице объёма за счёт генерации потоком фотонов, равно n_0 . В последующие моменты времени t число носителей в том же объёме уменьшается за счёт рекомбинации по закону $n = n_0 \exp(-t/\tau)$, где τ – время жизни носителей. Другими словами, скорость рекомбинации равна $1/\tau$. Если поток фотонов постоянен и распределён равномерно по поверхности фоторезистора с площадью $A = WL$, то общее число фотонов, падающих на поверхность в единицу времени, равно $P/h\nu$, где P – мощность падающего излучения и $h\nu$ – энергия фотона.

В стационарном состоянии скорость генерации носителей должна быть равна скорости рекомбинации. Если толщина прибора D значительно больше, чем глубина проникновения света $1/\alpha$, то общая стационарная скорость генерации носителей в единице объёма равна

$$G = \frac{n}{\tau} = \frac{\eta(P/h\nu)}{WLD} \quad (2)$$

где η – квантовая эффективность (т.е. число фотогенерированных носителей, отнесённое к числу падающих фотонов) и n – число носителей в единице объёма (плотность но-

сителей). Фототок, протекающий между контактами, если к фоторезистору приложено напряжение U , равен

$$I_{\phi} = (\sigma \varepsilon) WD = (q \mu_n n \varepsilon) WD = (q n V_d) WD, \quad (3)$$

где $\varepsilon = \frac{U}{L}$ – электрическое поле внутри фоторезистора и V_d – дрейфовая скорость.

Подставляя n из уравнения (2) в уравнение (3), получим

$$I_{\phi} = q \left(\eta \frac{P}{h\nu} \right) \left(\frac{\mu_n \tau \varepsilon}{L} \right) \quad (4)$$

Определяя исходный фототок как

$$I_{\phi_{исх}} = q \left(\eta \frac{P}{h\nu} \right) \quad (5)$$

получим коэффициент усиления фототока

$$\frac{I_{\phi}}{I_{\phi_{исх}}} = \frac{\mu_n \tau \varepsilon}{L} = \frac{\tau}{t_{\text{прол}}}, \quad (6)$$

где $t_{\text{прол}} = LV_d$ – время пролёта носителей. Коэффициент усиления, зависящий от отношения времени жизни и времени пролёта, является исключительно важным параметром фоторезисторов. Для образцов с большим временем жизни и малым расстоянием между контактами коэффициент усиления может быть существенно больше единицы. Время фотоответа фоторезистора определяется временем пролёта $t_{\text{прол}}$. Поскольку для фоторезисторов характерны большие расстояния между контактами и слабые электрические поля, то их время фотоответа обычно больше аналогичного параметра для фотодиодов [2].

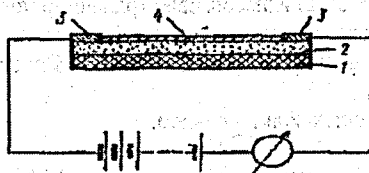


Рисунок 2 – Схема фоторезистора

На рисунке 2 показана схема одного из типов фоторезисторов. Она состоит из тонкого полупроводникового слоя 2, нанесенного на изолирующую подложку 1, металлических электродов, выполненных из благородных металлов 3, посредством которых фотосопротивление включается в цепь и не подвержено коррозии, и защитного лакового покрытия 4. Наиболее чувствительные фоторезисторы изготавливают из сернистого кадмия (CdS), у которого фотопроводимость в 10^5 - 10^6 раз превышает темновую проводимость. Широкое распространение получили фоторезисторы из сернистого свинца (PbS), чувствительного к далекой инфракрасной области спектра. Используются и другие полупроводниковые материалы. Основным преимуществом фоторезисторов перед вакуумными фотозлементами является высокая световая чувствительность. У селеново-кадмиевых фоторезисторов, например, она примерно в 10^5 раз выше, чем у вакуумных фотозлемента. Недостатком фоторезисторов является их инерционность [3].

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Епифанов, Г.И. Физика твёрдого тела. – М., Высшая школа, 1977. – С. 168-173.
2. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984. – Т. 2. – С. 339-393.
3. Пасынков, В.В. Полупроводниковые приборы / В.В. Пасынков, В.В. Чиркин. – М.: Высшая школа, 1987. – С. 378-393.