

О вольт-амперной характеристике полупроводникового диода.

Считается, что вольт-амперная характеристика полупроводникового диода описывается следующей формулой [1]:

$$I = I_s (e^{\frac{eU}{kT}} - 1). \quad (1)$$

Величина I_s (тока насыщения) почти не зависит от напряжения, и ее можно считать константой [1]. К формулам, схожим с (1), приводят и «диффузионная», и так называемая «диодная» теории для процессов в р-п переходе [1,2]. Но инженеры-практики знают, что диод можно включать в цепь с целью снижения напряжения на некую почти постоянную величину (для кремниевых диодов эта величина составляет примерно 0,6 – 0,7 вольт). Возможной моделью, допускающей такое применение кремниевого диода, является вольт-амперная характеристика в виде вертикальной линии, идущей из точки 0,6 вольт на оси напряжений вверх (параллельно оси тока). Между тем, из формулы (1) существование такого характерного напряжения не просматривается.

Информацию о том, что экспоненциальная формула (1) не является точной, также можно найти в монографии [2]. Далее в настоящей работе будет предложена уточненная формула для вольт-амперной характеристики р-п перехода (для прямого тока).

В работе «Рекомбинация в р-п переходе», размещенной в Интернете (сайт <http://science-nighny.narod.ru>) было рассмотрено следующее выражение для сопротивления излучающего свет р-п перехода:

$$R = \frac{\hbar\omega_{21}}{eI}.$$

Обратим внимание – выражение зависит от тока, причем ток стоит в знаменателе, так что при вычислении напряжения через ток по формуле

$$U = RI$$

мы получим константу, зависящую от свойств материала (от ширины энергетической щели). Эта константа была названа прямым падением напряжения на «идеальном» светодиоде.

Допустим, что объемы полупроводникового материала по бокам от р-п перехода имеют и некоторое омическое сопротивление. Обозначим его как R_v («v» обозначает «объем»).

Представим себе светодиод в виде пары последовательно включенных сопротивлений. На одном из них падение напряжения соответствует «идеальному» светодиоду, на другом вычисляется в соответствии с законом Ома. Их сумма:

$$U = \frac{\hbar\omega_{21}}{e} + R_v I. \quad (2)$$

Все это имеет смысл для тока, который больше нуля. Можно учесть это вставкой в формулу (2) функции Хэвисайда.

$$U = h(I) \left\{ \frac{\hbar\omega_{21}}{e} + R_v I \right\}. \quad (2a)$$

Напомню - ступенчатая функция Хэвисайда $h(x)$ равна 1 при $x > 0$ и нулю при $x < 0$ (при $x = 0$ можно считать, что она равна $1/2$).

Вернемся к обычным полупроводниковым диодам. Можно провести эксперимент с диодом 1N4148 (или его аналогом: K522). Окажется, что при повышении напряжения асимптотика вольт-амперной характеристики (при токах от 20 до 65 мА – при более высоких значениях тока измерения лично мной не проводились) прекрасно описывается формулой (2). Это наталкивает на мысль, что в обычном полупроводниковом диоде тоже происходит существенный переход энергии в некую волновую форму (имеются ввиду электромагнитные или акустические волны) за счет рекомбинации электронов и дырок. Выдвинем предположение: подобное приближение вольт-амперной характеристики к прямой линии должно наблюдаться и в других диодах, через которые могут протекать достаточно большие токи (если подобное поведение не будет «замаскировано» какими-либо нелинейными эффектами).

Рассмотрим теперь «нижний» участок характеристики. Реальная вольт-амперная характеристика диода не идет по прямой при снижении тока и напряжения (имеет место изгибание кривой вольт-амперной характеристики вблизи нуля и почти полное слияние ее с осью напряжений). Попробуем подобрать аппроксимирующее выражение следующим образом (с использованием функции Хэвисайда, делящей бесконечную прямую напряжения на три области):

$$U = h(I)\{U_R + R_v I + h\left(\frac{U_0}{kR_v} - I\right)(-U_0 + \sqrt{kIR_v U_0})\}, \quad (3)$$

$$U_R = \frac{\hbar\omega_{21}}{e}.$$

Здесь U_0 можно рассматривать как высоту потенциального барьера, существующего в закрытом р-п переходе, k – некоторый коэффициент. Отметим, что мы в данной работе пренебрегаем наличием небольшого тока через диод при напряжении, близком к нулю, а также при обратном напряжении.

К обоснованию этой формулы: можно считать, что в интервале токов от 0 до $\frac{U_0}{kR_v}$ часть тока «выбывает из игры» по причине наличия потенциального барьера (U_0). Введем долю частиц, проходящих через барьер:

$$\alpha = \frac{U}{kU_0}.$$

Здесь k – коэффициент, который по каким-либо причинам уменьшает долю прошедших частиц.

Тогда ток в этом интервале выражается так:

$$I = \frac{U}{R_v} \alpha = \frac{U^2}{R_v k U_0}.$$

Границам изменения тока соответствуют границы изменения напряжения от 0 до U_0 . Напряжение через ток выражается так:

$$U = \sqrt{IR_v k U_0}.$$

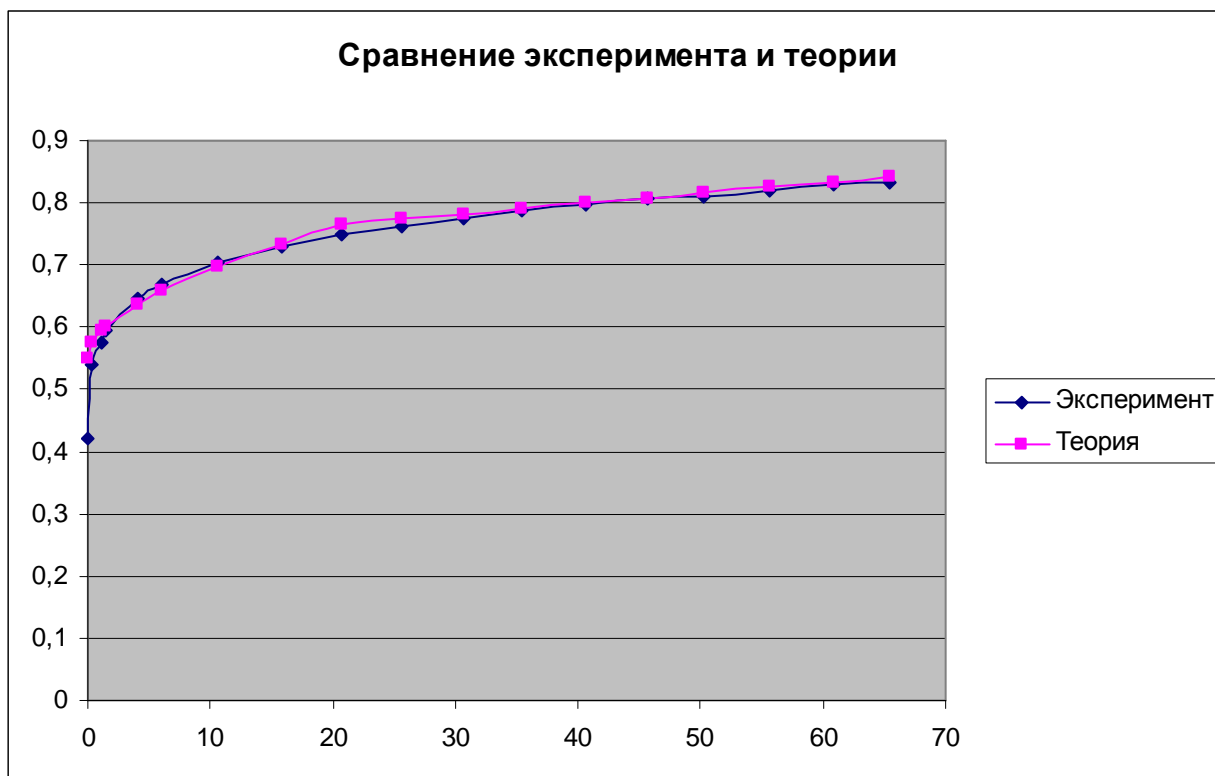
Далее мы сдвинем это выражение по оси напряжения вниз на U_0 и получим третье слагаемое в формуле (4). Конечно, логически безупречным данное обоснование назвать трудно, но, тем не менее, мы имеем некоторую цепочку действий, которая приводит к предлагаемому результату.

Итак, при положительном токе падение напряжения на диоде складывается из трех частей:

- 1) Падение напряжения на излучающем некий квант р-п переходе (то, что ранее для светодиода было названо «падением напряжения на идеальном светодиоде»).
- 2) Омическое падение напряжения в объеме полупроводника.

3) «Барьерное» падение напряжения. Не все электроны преодолевают потенциальный барьер, следствием этого является дополнительное падение напряжения на переходе.

Приведем график (выполненный с помощью приложения MS Excel), на котором представлены реальные данные (точками в виде ромбиков) и данные расчета (квадратиками):



Здесь по горизонтали – ток в миллиамперах, по вертикали – напряжение в вольтах.
 Параметры:

$$R_v = 0.0017, \quad k = 5.1, \quad U_0 = 0.18, \quad U_R = 0.73.$$

При малых токах совпадение не является, конечно, идеальным (линия реальных данных идет более плавно), но, тем не менее, кривые идут достаточно близко друг к другу. При больших токах совпадение весьма хорошее. Отметим также, что теоретическая кривая имеет небольшой излом около точки 20 мА – это есть граница нелинейного режима. Экспериментальная кривая более гладкая, но ее тоже можно поделить на линейную и нелинейную части. Понятно, что можно попробовать подобрать более точную формулу, но предложенное выражение ценно своей относительной простотой – фактически мы имеем дело с алгебраическим уравнением второй степени.

Выразим теперь ток через напряжение. Для начала нужно вычислить две граничные точки:

$$U_p = U_R - U_0 \left(1 - \frac{1}{k}\right),$$

$$U_{p2} = U_R + \frac{U_0}{k}.$$

Выражение для тока также включает в себя функции Хэвисайда:

$$\begin{aligned}
I = & h(U - U_{p2}) \frac{U - U_R}{R_v} + \\
& + [h(U - U_p) - h(U - U_{p2})] \left\{ \frac{U + U_0(1 + \frac{k}{2}) - U_R}{R_v} - \right. \\
& \left. - \frac{1}{R_v} \sqrt{U_0 k (U + U_0 - U_R) + \frac{U_0^2 k^2}{4}} \right\}.
\end{aligned} \tag{4}$$

Мы пренебрегаем (как уже отмечалось) наличием небольшого тока при малых напряжениях ($U < U_p$).

Далее будем искать пересечение вольт-амперной характеристики диода с нагрузочной линией

$$I = \frac{E - U}{r},$$

где r – суммарное сопротивление источника напряжения и нагрузки, включенных последовательно вместе с диодом.

Ограничимся нахождением точки пересечения для линейного участка характеристики. Сперва найдем граничные точки U_p и U_{p2} . При $U > U_{p2}$ (это самый правый участок)

$$\frac{E - U}{r} = \frac{U - U_R}{R_v}.$$

Предположим, что мы находимся именно на этом участке характеристики (и именно на этом участке и произойдет пересечение). Найдем точку пересечения:

$$U = \frac{ER_v + U_R r}{R_v + r}.$$

Если найденное значение напряжения действительно больше U_{p2} , то можно считать задачу решенной. В противном случае нам придется иметь дело с центральным нелинейным участком характеристики. Расчеты, относящихся к этому случаю, мы здесь приводить не будем.

Вывод: автор надеется, что применение предложенных формул (а также их возможных обобщений) поможет производить более близкие к реальности расчеты полупроводниковых устройств.

Список литературы:

1. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. «Физика полупроводников», М.: Наука 1990.
2. Степаненко И.П. «Основы теории транзисторов и транзисторных схем», М.: Энергия 1977.