

**Требования к проектам:** Программы должны работать под Windows 7 в базовой конфигурации. «Дружественный» и понятный интерфейс. Желательно чтобы программа запускалась одним файлом – без привлечения библиотек и языков, которые нужно предварительно устанавливать на компьютер. Будут дополнительные консультации по физике и по используемым формулам.

**Следующая задача непростая и объёмная, поэтому решил дать её двум командам – причём каждая будет состоять из 2-х пар! В случае успешного решения обе команды (каждая уже из 4-х человек) получат автоматы.**

### Задача 3. Удельная проводимость от температуры.

**Часть первая – подвижность.**

Первая пара находит аналитическое выражение для температурной зависимости подвижности для электронов и дырок для кремния, германия и арсенида галлия.

**Это отдельная программа – результаты её будут использоваться второй командой -**

Итак, надо найти зависимость проводимости от температуры.

Про зависимость подвижности от температуры можно почитать здесь.

Для кремния – <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/Si/electric.html#Basic>

Для германия - <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/Ge/electric.html#Basic>

Для арсенида галлия - <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaAs/electric.html#Basic>

В общем виде -

<http://dssp.petrus.ru/p/tutorial/ftt/Part10/part10.10.htm>

<http://foez.narod.ru/19.htm>

Будем упрощённо описывать зависимость подвижности от температуры такой моделью.

$$\mu_n(T) = \frac{C_n}{\left(\frac{T}{T_{0n_{phonon}}}\right)^{3/2} + (N_d^+ + N_a^-) \left(\frac{T_{0n}}{T}\right)^{3/2}} \quad (3.1)$$

$$\mu_p(T) = \frac{C_p}{\left(\frac{T}{T_{0p_{phonon}}}\right)^{3/2} + (N_a^- + N_d^+) \left(\frac{T_{0p}}{T}\right)^{3/2}} \quad (3.2)$$

Собственно цель задачи – найти (подогнать к известным из ссылок выше экспериментальным данным) 6 констант – по 3 для электронов и для дырок. Например, для дырок это константы  $C_p$ ,  $T_{0p_{phonon}}$  и  $T_{0p}$ . То есть по формулам вычисляем подвижность для материалов с различными  $N_d$  и  $N_a$ , выводим график от температуры и сравниваем с известными литературными данными для кремния, германия и арсенида галлия и подгоняем константы. Проблема конечно заключается в том, что концентрации заряженных доноров и акцепторов  $N_d^-$  и  $N_a^+$ , сами зависят от температуры.

В итоге, с подогнанными правильными константами программа строит графики подвижностей для электронов и для дырок от температуры. Строим всё в СИ то есть в единицах [метр<sup>2</sup>/(Вольт·секунда)]. Нужна опция сохранения графиков в ASCII кодах в виде двух столбцов. В интерфейсе также должна быть опция – выбор нужного материала – кремний, германий или арсенид галлия.

Программа должна считать и строить графики зависимостей подвижности от температуры и демонстрировать что это всё неплохо совпадает с экспериментом. То есть данные из ссылок выше надо оцифровать – чтобы выводить на графики.

**Результаты зависимости подвижности от температуры для всех трёх материалов передаётся другой команде.**

**Часть вторая - находим концентрацию свободных электронов и дырок** (решение этой задачи я демонстрировал на лекциях) а потом и **проводимость** от температуры.

Удельная проводимость это произведение концентрации на заряд и на подвижность – и сумма всего этого для электронов и дырок.

В интерфейсе также должна быть опция – выбор нужного материала – кремний, германий или арсенид галлия. Параметры полупроводника – запрещённая зона  $E_g$ , эффективные массы плотности состояний в долинах для дырок и для электронов также берутся из ссылок выше. Положение уровня донора  $E_d$ , концентрация доноров  $N_{d0}$ , положение уровня акцептора  $E_a$ , концентрация акцепторов  $N_{a0}$ , температура  $T$  (или диапазон температур) – вводятся в меню.

Программа переводит все в единицы в СИ.

Все энергии отсчитывает от потолка валентной зоны, только энергия донора вниз от дна зоны проводимости.

Сначала находим эффективную плотность состояний для электронов и дырок.

$$N_{C(V)} = 2,51 \cdot 10^{19} \left( \frac{m_{c(v)}}{m_0} \right)^{3/2} \left( \frac{T}{300} \right)^{3/2} \cdot \text{см}^{-3}$$

Положение уровня Ферми в квазинейтральном объёме находим из электронейтральности:

$$n = N_C \cdot e^{\frac{\mu - E_g}{kT}} \quad p = N_V \cdot e^{\frac{-\mu}{kT}}$$

Доля заряженных доноров определяется положением уровня Ферми

$$N_d^+ = N_{d0} \frac{1}{1 + e^{\frac{E_g - E_d - \mu}{kT}}}$$

Доля заряженных акцепторов определяется положением уровня Ферми

$$N_a^- = N_a \frac{1}{1 + e^{\frac{\varepsilon_a - \mu}{kT}}}$$

$$N_d^+ + p = n + N_a^-$$

Положение уровня Ферми находится из уравнения

Зная положение уровня Ферми находим концентрации свободных электронов и дырок а также концентрацию **заряженных** доноров и акцепторов. Потом, из формул 3.1 и 3.2 с

учётом знания констант (полученных командой 1) и концентраций **заряженных** доноров и акцепторов  $N_d^-$  и  $N_a^+$ , вычисляется подвижность.

Потом вычисляется проводимость как:

$$\sigma = e(n \cdot \mu_e + p \cdot \mu_p)$$

Программ вычисляет и рисует графики от температуры для концентрации электронов и дырок, концентрации заряженных доноров и акцепторов, подвижность электронов и дырок, а главное – **удельная проводимость!**

Опция - графики зависимости подвижности от температуры можно сохранять в ASCII кодах. Пример показывал на лекциях –но там в программе были ошибки.

### **По всем задачам –**

Нужны консультации – звоните или пишите. Первая версия программы должны быть готова к середине декабря – надо будет опробовать правильность и качество графики.

Успехов!