

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Волгоградский государственный технический университет»
Факультет электроники и вычислительной техники
Кафедра физики

Семестровая работа по дисциплине
«Радиоэлектроника»

Выполнили
студенты группы Ф-469
Слоква В. И.,
Чечеткин И. А.

Проверил профессор,
доктор физ.-мат. наук
Смоляр В. А.

Волгоград, 2014

Содержание

Параметры полупроводника	3
1 Концентрация электронов и дырок в собственном полупроводнике	4
2 Код программы	7
Список литературы	10

Параметры полупроводника

Таблица 1 — Параметры полупроводника

Кремний (Si)	
Эффективная масса электронов	$1,08 \cdot m_e$
Эффективная масса дырок	$0,56 \cdot m_e$
Энергия дна зоны проводимости, эВ	4,02
Энергия вершины валентной зоны, эВ	5,23
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,21

1 Концентрация электронов и дырок в собственном полупроводнике

Концентрация электронов в зоне проводимости равна:

$$n = 2 \cdot \int_{E_C}^{\infty} N(E) f(E, T) dE. \quad (1)$$

Если уровень Ферми F лежит в запрещенной зоне энергий и удален от края зоны E_C хотя бы на $2kT$, то в распределении Ферми-Дирака (2)

$$f(E, T) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - F}{kT}}} \quad (2)$$

единицей в знаменателе можно пренебречь и оно переходит в распределение Максвелла-Больцмана классической статистики (для кремния показаны на рис. 1). Это случай невырожденного полупроводника:

$$f(E, T) = e^{-\frac{E - F}{kT}}. \quad (3)$$

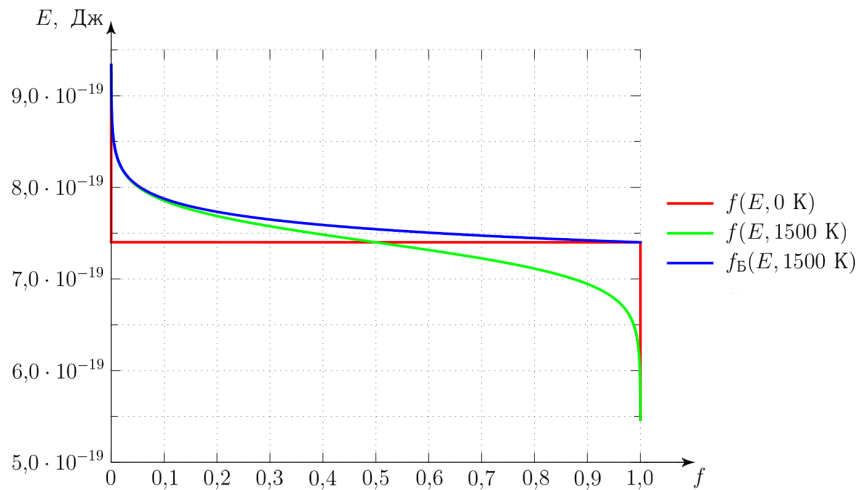


Рисунок 1 — Функции Ферми-Дирака f и Больцмана f_B для температуры 1500 K

Плотность состояний в зоне проводимости $N(E)$ выражается формулой

$$N(E) = \frac{4\pi m_n^{3/2} \cdot \sqrt{2(E - E_C)}}{h^3}, \quad (4)$$

где $m_n^{3/2}$ — эффективная масса электрона, E_C — энергия, соответствующая дну зоны проводимости.

Если вместо $(E - E_C)$ подставить $(E_V - E)$, а вместо m_n – эффективную массу дырки m_p , то получим формулу плотности состояний в валентной зоне.

Для кремния $N(E)$ выглядит так, как показано на рисунке 2.

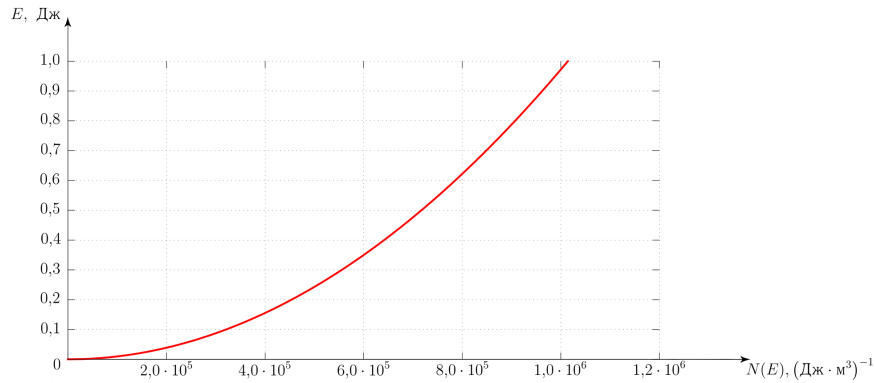


Рисунок 2 — Функция распределения плотности состояний в зоне проводимости $N(E)$

Подставив (3) и (4) в (1), получим:

$$n = N_C \cdot e^{-\frac{E_C - F}{kT}}, \quad (5)$$

где N_C – эффективная плотность состояний в зоне проводимости:

$$N_C = 2 \cdot \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{3/2}.$$

Концентрация дырок в валентной зоне:

$$p = N_V \cdot e^{-\frac{F - E_V}{kT}}, \quad (6)$$

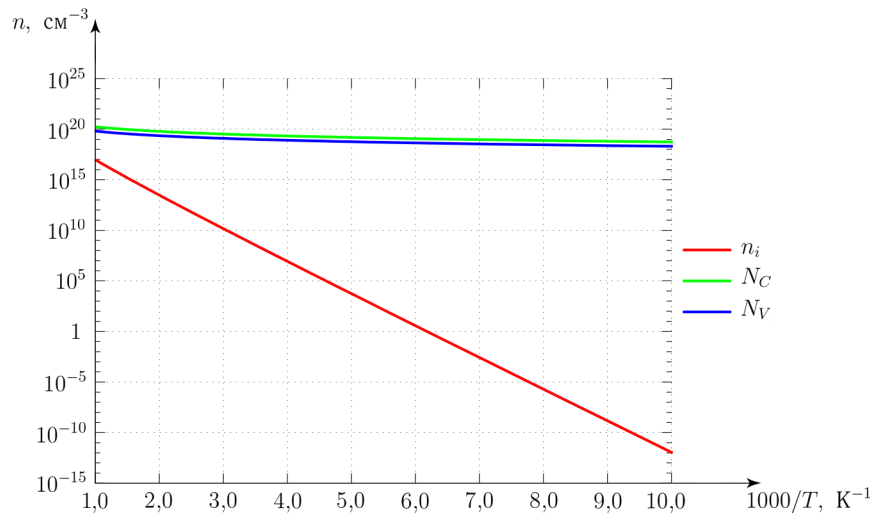


Рисунок 3 — Зависимость $n_i(T)$, $N_C(T)$, $N_V(T)$

где N_V – эффективная плотность состояний в валентной зоне:

$$N_V = 2 \cdot \left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2} \right)^{3/2}.$$

Для расчета n и p по уравнениям (5) и (6) необходимо знать положение уровня Ферми F . Однако произведение концентраций электронов и дырок для невырожденного полупроводника не зависит от уровня Ферми, хотя зависит от температуры:

$$n \cdot p = (n_i)^2 = N_C \cdot N_V \cdot e^{-\frac{E_g}{kT}}. \quad (7)$$

Концентрацию собственных носителей заряда в зоне проводимости и в валентной зоне рассчитаем из формулы (7). Для кремния зависимость $n_i(T)$, $N_C(T)$, $N_V(T)$ отображена на рисунке 3.

2 Код программы на С (с использованием gnuplot)

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

const double e    = 1.6E-19;
const double m_e  = 9.1E-31;
const double k    = 1.38E-23;
const double h    = 6.63E-34;
const double h2   = h * h;
const double h3   = h * h * h;

const float  m_p  = 0.56 * m_e;
const float  m_n  = 1.08 * m_e;
const float  E_c  = 4.02;
const float  E_g  = 1.21;
const float  E_v  = E_c + E_g;
const float  F    = E_c + E_g / 2.0;

char elem_name[] = "Si";
char def_file[] = "data.txt";

double n_x(float m_x, float T)
{
    return 2.0 * pow(2.0 * M_PI * m_x * k * T / h2, 1.5) * 1E-6;
}

double fermi(double E, double T)
{
    return 1.0 / (1 + exp((E - F)*e / (k * T)));
}

double boltz(double E, double T)
{
    return exp(-(E - F)*e/(k * T));
}

double f(double m, double E)
{
    return 4.0 * M_PI * pow(m, 1.5) * sqrt(2.0 * (E - E_c)) / h3;
}

double n_e(float E)
{
    return 4.0 * M_PI * pow(m_n, 1.5) * sqrt(2.0 * (E - E_c)*e) / h3;
}

int main(void)
{

```

```

FILE *f, *p;
const float T0 = 100.0f, T1 = 1000.0f, dt = 10.0f;
float T, E;
double N_c, N_v, n_i;

f = fopen(def_file, "w");
for (T = T0; T < T1; T += dt) {
    N_c = n_x(m_n, T);
    N_v = n_x(m_p, T);
    n_i = pow(N_c * N_v, 0.5f) * exp(-E_g * e / (2.0f * k * T));
    fprintf(f, "%.4E %.4E %.4E %.4E\n", 1000.0f / T, n_i, N_c, N_v);
}
fclose(f);

p = popen("gnuplot -p", "w");
fprintf(p,
    "set terminal pdfcairo enhanced color font 'Ubuntu, 10' size 4.0in,\n"
    "set border 3\n"
    "set grid\n"
    "set output 'n_i.pdf'\n"
    "set title '%s'\n"
    "set key outside right center spacing 1.3\n"
    "set logscale y\n"
    "set xtics 1.0\n"
    "set format x '%%.1f'\n"
    "set format y '10^{%%L}'\n"
    "set xlabel '1000/T, K^{-1}'\n"
    "set ylabel 'n, cm^{-3}'\n", elem_name);
fprintf(p, "plot '%s' using 1:2 title ' n_i' with lines lc 1 lw 4 lt\n"
    "'%s' using 1:3 title ' N_c' with lines lc 2 lw 4 lt 2, "\n"
    "'%s' using 1:4 title ' N_v' with lines lc 3 lw 4 lt 5\n",
    def_file, def_file, def_file);
pclose(p);

f = fopen(def_file, "w");
for (E = E_c - E_g / 2.0; E <= E_v + E_g / 2.0f; E += 1E-3) {
    fprintf(f, "%.4E %.4E %.4E %.4E %.4E %.4E %.4E %.4E\n",
        E*e, fermi(E, 0.001),
        fermi(E, 1500), boltz(E, 1500));
}
fclose(f);

p = popen("gnuplot -p", "w");
fprintf(p,
    "set terminal pdfcairo enhanced color font 'Ubuntu, 10'\n"
    "set border 3\n"
    "set grid\n"
    "set output 'f.pdf'\n"
    "set title '%s'\n"
    "set xrange [0:1]\n"
    "set xtics 0.1\n"
    "set format y '%%.1t\u00D710^{%%T}'\n"

```



```

    "set key outside right center spacing 1.3\n"
    "set xlabel 'f'\n"
    "set ylabel 'E, J'\n", elem_name
);
fprintf(p, "plot '%s' using 2:1 title 'Fermi, T = 0 K' with lines lc
    "'%s' using 3:1 title 'Fermi, T = 1500 K' with lines lc 2 lw 4
    "'%s' using 4:1 title 'Boltzmann, T = 1500 K' with lines lc 3 lw 4
    def_file, def_file, def_file);

pclose(p);

f = fopen(def_file, "w");
for (E = 0.0f; E < 1.0f; E += 1E-3) {
    fprintf(f, "%.4E %.4E\n", E, n_e(E));
}
fclose(f);

p = popen("gnuplot -p", "w");
fprintf(p,
    "set terminal pdfcairo enhanced color font 'Ubuntu, 10'\n"
    "set border 3\n"
    "set grid\n"
    "set output 'N_E.pdf'\n"
    "set title '%s'\n"
    "set format x '%%.1t\u00D710^{%%T}'\n"
    "set format y '%%.2f'\n"
    "set xrange [0:*\n"
    "set xlabel 'N(E)'\n"
    "set ylabel 'E, J'\n", elem_name
);
fprintf(p, "plot '%s' using 2:1 notitle with lines lc 1 lw 4 lt 1\n",
pclose(p);
return EXIT_SUCCESS;
}

```

Список литературы

- [1] Гуртов, В. А. Твердотельная электроника: Учеб. пособие / В. А. Гуртов. – М., 2005. – 492 с.
- [2] NSM Archive – Physical Properties of Semiconductors
<http://www.matprop.ru/semicond>