

№ 1641

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ СТАЛИ и СПЛАВОВ**  
Технологический университет

**МИСиС**



Кафедра полупроводниковой электроники и физики полупроводников

**Определение параметров полупроводника  
по температурным зависимостям ЭДС Холла,  
времени жизни носителей заряда  
и электропроводности**

**Методические указания**  
к выполнению курсовой работы  
для студентов направлений 6541, 5507, 5531,  
обучающихся по специальностям 200100, 071000

**Часть 1**

Рекомендованы редакционно-издательским  
советом института

УДК 539.293  
М23

М23    Определение параметров полупроводника по температурным зависимостям ЭДС Холла, времени жизни носителей заряда и электропроводности: Метод. указания / Сост. Ф.И. Маняхин. М.: МИСиС, 2002. – 65 с.

Приведена методика расчета основных параметров полупроводника – ширины запрещенной зоны, энергии ионизации примесных и рекомбинационных центров – по температурным зависимостям ЭДС Холла, времени жизни носителей заряда и электропроводности.

Описана интерактивная компьютерная расчетная программа в среде *Mathcad*, имитирующая реальную ситуацию экспериментального исследования свойств полупроводника по температурным зависимостям его основных параметров.

Приведено подробное поэтапное описание методики расчета, а также программа расчета в среде *Mathcad* с описанием файлов основной программы и субпрограмм.

Предлагаемая методика может быть использована как в учебном процессе, так и в научных исследованиях.

Пособие состоит из двух частей. Первая часть предназначена для студентов направлений 6541, 5531, 5507, обучающихся по специальностям 200100, 071000, выполняющих курсовую работу по физике твердого тела. Вторая часть предназначена для преподавателей, составляющих задания к курсовой работе.

© Московский государственный  
институт стали и сплавов  
(Технологический университет)  
(МИСиС), 2002

# ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Теоретическое введение .....	4
2. Задание к курсовой работе .....	14
3. Краткое руководство для пользователей программы <b>MATHCAD PROFESSIONAL</b> .....	15
3.1. Главное меню программы .....	15
3.2. Инструментальные панели .....	16
3.3. Операторы .....	18
3.4. Порядок выполнения курсовой работы с использованием программы <b>Mathcad</b> .....	20
3.4.1. Создание директории для пакета расчетных файлов и файлов данных .....	20
3.4.2. Порядок работы с пакетом Kurs_ftt .....	20
4. Требования по оформлению пояснительной записки к курсовой работе и порядок ее защиты .....	29
5. Контрольные вопросы .....	30
6. Библиографический список .....	31
Приложение I (файл Kurs_ftt.mcd). Определение параметров полупроводника по температурным зависимостям электропроводности, ЭДС Холла и времени жизни носителей заряда .....	32
Приложение II (файл Mu.mcd). Расчет подвижности носителей заряда .....	44
Приложение III <sub>n</sub> (файл N_f.mcd). Расчет температурной зависимости концентрации основных носителей заряда и температурной зависимости энергии Ферми в донорном полупроводнике, базирующийся на решении уравнения электронейтральности .....	48
Приложение III <sub>p</sub> (файл P_f.mcd). Расчет температурной зависимости концентрации основных носителей заряда и температурной зависимости энергии Ферми в акцепторном полупроводнике, базирующийся на решении уравнения электронейтральности .....	52
Приложение IV <sub>n</sub> (файл tn.mcd). Расчет времени жизни носителей заряда в донорном полупроводнике .....	56
Приложение IV <sub>p</sub> (файл tp.mcd). Расчет времени жизни носителей заряда в акцепторном полупроводнике .....	60
Приложение V. Шаблон титульного листа пояснительной записки к курсовой работе .....	64

# 1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Основными эксплуатационными параметрами полупроводника являются тип и концентрация легирующей примеси, удельная электропроводность, время жизни и подвижность носителей заряда.

В то время как концентрация легирующей примеси остается постоянной при любых температурных условиях, ее зарядовое состояние зависит от температуры существенным образом в определенных температурных интервалах.

Последнее обстоятельство, в свою очередь, сказывается на зависимости от температуры времени жизни носителей заряда  $\tau(T)$ , их подвижности  $\mu(T)$ , электропроводности  $\sigma(T)$  и ЭДС Холла  $E_H(T)$ . Функциональные соотношения, отражающие эти закономерности, полученные на основании физической модели полупроводника приведены ниже.

Электропроводность  $\sigma$  определяется по соотношению:

$$\sigma(T) = q \frac{S}{l} [n_0(T)\mu_n(T) + p_0(T)\mu_p(T)], \quad (1.1)$$

где  $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – элементарный заряд;

$S$  – площадь образца;

$l$  – длина образца;

$n_0(T)$ ,  $p_0(T)$  – концентрация электронов и дырок при температуре  $T$ , соответственно;

$\mu_n(T)$ ,  $\mu_p(T)$  – подвижность электронов и дырок при температуре  $T$ , соответственно.

Для невырожденного полупроводника концентрация электронов и дырок, соответственно, определяется следующим образом:

$$n_0 = N_C e^{-\frac{E_C - F}{kT}}, \quad p_0 = N_V e^{-\frac{F - E_V}{kT}}, \quad (1.2)$$

где  $N_C$ ,  $N_V$  – эффективные плотности состояний в зоне проводимости и в валентной зоне, соответственно;

$F$  – энергия Ферми;

$E_C$ ,  $E_V$  – энергия краев зоны проводимости и валентной зоны, соответственно;

$k$  – постоянная Больцмана.

В свою очередь, эффективные плотности состояний в зоне проводимости и в валентной зоне, соответственно, определяются выражениями

$$N_C = 2 \left( \frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} = 2,5 \cdot 10^{19} \left( \frac{m_n^*}{m_0} \right)^{3/2} \left( \frac{T}{300} \right)^{3/2}, \text{ см}^{-3}; \quad (1.3)$$

$$N_V = 2 \left( \frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2} = 2,5 \cdot 10^{19} \left( \frac{m_p^*}{m_0} \right)^{3/2} \left( \frac{T}{300} \right)^{3/2}, \text{ см}^{-3}.$$

где  $m_n^*$ ,  $m_p^*$  – эффективные массы электронов и дырок, соответственно.

Индекс « $n$ » или « $p$ » соответствует полупроводнику донорного или акцепторного типа, соответственно.

Температурная зависимость подвижности электронов и дырок, соответственно, обусловлена температурной зависимостью времени свободного пробега носителей заряда:

$$\mu_n(T) = \frac{q\tau_{\text{псв}}(T)}{m_n}; \quad \mu_p(T) = \frac{q\tau_{\text{рсв}}(T)}{m_p} \quad (1.4)$$

где  $\tau_{\text{псв}}(T)$ ,  $\tau_{\text{рсв}}(T)$  – время свободного пробега электронов и дырок, соответственно, при температуре  $T$ , определяемые выражениями.

$$\tau_{\text{псв}}(T) = \left[ \frac{1}{\tau_{nl}(T)} + \frac{1}{\tau_{ni}(T)} \right]^{-1}, \quad \tau_{\text{рсв}}(T) = \left[ \frac{1}{\tau_{pl}(T)} + \frac{1}{\tau_{pi}(T)} \right]^{-1}, \quad (1.5)$$

здесь  $\tau_l$  – время свободного пробега при рассеянии на ионах примеси;  $\tau_i$  – время свободного пробега при рассеянии на акустических фононах.

Температурная зависимость  $\tau_l(T)$  отражается соотношением

$$\tau_l = \frac{9\pi}{4\sqrt{2}} \frac{\hbar^4 V_{\text{зв}}^2 M}{C^2 a^3 k m^*{}^{3/2}} T^{-1} E^{-1/2}, \quad (1.6)$$

где  $V_{\text{зв}}$  – скорость звука в полупроводнике;

$M$  – масса атома полупроводника;

$C$  – постоянная, имеющая размерность энергии, характеризую-

шая интенсивность взаимодействия электронов с колебаниями решетки;

$a$  – параметр решетки;

$E$  – энергия носителя заряда;

$\hbar$  – постоянная Планка.

При рассеянии на ионах примеси время свободного пробега зависит от температуры согласно соотношению:

$$\tau_I = \frac{(\epsilon\epsilon_0)^2 m^{*2} V_T^3}{2\pi Z^2 q^4 N_I \ln \left[ 1 + \left( \frac{\epsilon\epsilon_0 m^* V_T^2}{2Zq^2 N_I^{1/3}} \right)^2 \right]}, \quad (1.7)$$

где  $V_T = \left( \frac{3kT}{m^*} \right)^{1/2}$  – тепловая скорость;

$Z$  – заряд иона;

$N_I$  – концентрация ионов примеси;

$\epsilon, \epsilon_0$  – относительная и абсолютная диэлектрические постоянные, соответственно.

На температурных зависимостях параметров полупроводника можно выделить три основные температурные области (рис. 1.1): область I низких температур ( $0 \dots T_S$ ), область II истощения примеси ( $T_S \dots T_i$ ) и область III собственной проводимости ( $T > T_i$ ).

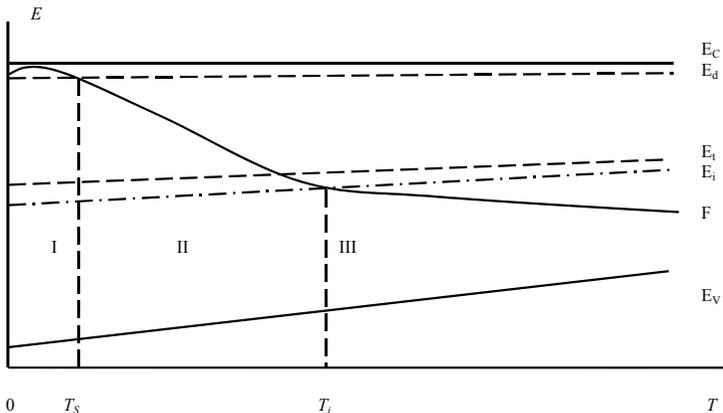


Рис. 1.1. Температурные зависимости ширины запрещенной зоны ( $E_C - E_V$ ) и энергии Ферми  $E$  в донорном полупроводнике