

Лабораторная работа №1.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ АРСЕНИДА ГАЛИЯ МЕТОДОМ ВАН – ДЕР – ПАУ

Цель работы: измерение электрофизических параметров тонких слоев полупроводников методом Ван – дер – Пау: постоянной Холла, удельного сопротивления, концентрации и подвижности основных носителей.

Приборы и оборудование: источник питания УНИП – 5, магазин сопротивления Р33, миллиамперметр Ц4311, пульт управления, образец с держателем, постоянный магнит на 2700 эрстед, вольтметр.

1. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ.

При исследовании полупроводников большую роль играет изучение так называемых явлений переноса или, иначе, кинетических явлений. Общая причина этих явлений заключается в том, что электроны проводимости при своем движении переносят связанные с ними физические величины: массу, электрический заряд, энергию и др. Вследствие этого при определенных условиях возникают направленные потоки этих величин, приводящие к ряду электрических и тепловых эффектов. Укажем кратко важнейшие кинетические явления, особенно интересные для исследования полупроводников.

а. *Электропроводность.* В отсутствие внешнего электрического поля электроны в кристалле совершают только тепловое движение со скоростями v_T . Характер этого движения таков, что электрон некоторое время (время свободного пробега) движется приблизительно прямолинейно и равномерно, но затем, в результате взаимодействия с кристаллической решеткой, резко изменяет направление своего движения. Такие процессы изменения импульса мы будем называть в дальнейшем процессами рассеяния импульса. Они аналогичны соударениям атомов, рассматриваемым в кинетической теории газов. Вследствие беспорядочности теплового движения в

электронном газе в состоянии теплового равновесия нет преимущественных направлений движения, и поэтому среднее значение тепловой скорости равно нулю. Это значит, что средний поток частиц, а следовательно, и средняя плотность тока для любого направления равны нулю.

При наложении внешнего электрического поля электроны получают дополнительные скорости \mathbf{v} под действием поля. В этом случае результирующее движение электронов уже не является совершенно беспорядочным и возникает направленный поток электрического заряда (электрический ток). Среднее значение скорости упорядоченного движения для одного электрона (вычисленное для промежутка времени, охватывающего большое число соударений) мы будем обозначать через \bar{v} , а среднее значение этой скорости для всей совокупности электронов – через $\langle \mathbf{v} \rangle \equiv \mathbf{v}_d$. Среднюю скорость упорядоченного движения \mathbf{v}_d называют дрейфовой.

Во многих случаях оказывается, что дрейфовая скорость пропорциональна напряженности электрического поля \mathbf{E} . Поэтому весьма полезно понятие дрейфовой подвижности заряженных частиц μ , которая, по определению, есть дрейфовая скорость, приобретаемая частицей в поле с напряженностью единица. Или, иначе,

$$\mathbf{v}_d = \mu \mathbf{E}, \quad (1)$$

Для электронов подвижность μ отрицательна, для положительных частиц – положительна.

Если имеются заряженные частицы только одного типа, то плотность электрического тока равна

$$\mathbf{j} = en\mathbf{v}_d = en\mu \mathbf{E}, \quad (2)$$

где e – заряд одной частицы, а n – концентрация подвижных частиц. С другой стороны, согласно закону Ома,

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}, \quad (3)$$

где σ - удельная электропроводность вещества. (Физическая величина, обратная удельной электропроводимости называется удельным сопротивлением). Отсюда

$$\sigma = en\mu \quad (4)$$

Так как при изменении знака e одновременно изменяется и знак подвижности, то σ не зависит от знака заряда частиц.

В изотропных веществах дрейфовая скорость направлена либо параллельно полю (у положительных частиц), либо противоположно полю (у отрицательных частиц), поэтому μ и σ суть скаляры и, соответственно, векторы \mathbf{j} и \mathbf{E} совпадают по направлению. В анизотропных веществах это уже не имеет места и соотношение между \mathbf{j} и \mathbf{E} имеет более общий вид:

$$\begin{aligned} j_x &= \sigma_{xx}E_x + \sigma_{xy}E_y + \sigma_{xz}E_z, \\ j_y &= \sigma_{yx}E_x + \sigma_{yy}E_y + \sigma_{yz}E_z, \\ j_z &= \sigma_{zx}E_x + \sigma_{zy}E_y + \sigma_{zz}E_z. \end{aligned} \quad (5)$$

Или, в сокращенной записи,

$$j_\alpha = \sigma_{\alpha\beta} E_\beta \quad (\alpha, \beta = x, y, z), \quad (5a)$$

где подразумевается суммирование по повторяющемуся индексу. Следовательно, в этом случае явление переноса заряда определяется уже не единственным кинетическим коэффициентом, а совокупностью коэффициентов $\sigma_{\alpha,\beta}$, которые являются компонентами тензора второго ранга – тензора электропроводности.

б. *Изменение сопротивления в магнитном поле.* Внешнее магнитное поле изменяет плотность тока \mathbf{j} . Это значит, что сопротивление проводника в поперечном магнитном поле изменяется. Опыт показывает, что в некотором интервале

достаточно слабых магнитных полей изменение электропроводности $\Delta\sigma_{\perp}$ и удельного сопротивления $\Delta\rho_{\perp}$ подчиняются закону

$$-\frac{\Delta\sigma_{\perp}}{\sigma} = \frac{\Delta\rho_{\perp}}{\rho} = \chi_{\perp} \mathbf{B}^2 \quad (6)$$

Здесь σ и ρ - значения при $\mathbf{B} = 0$, а χ_{\perp} - “коэффициент поперечного магнетосопротивления”, зависящий от свойств материала.

Эффект магнетосопротивления есть непосредственный результат того, что в магнитном поле электропроводность становится тензором. Поэтому магнетосопротивление можно выразить через компоненты этого тензора. Полагая в соотношениях (5), как и раньше, $E_z = j_y = 0$ и исключая из первых двух соотношений поле E_y , получаем

$$j_x = \left(\sigma_{xx} + \frac{\sigma_{xy}^2}{\sigma_{xx}} \right) E_x.$$

Удельная электропроводность в поперечном магнитном поле равна

$$\sigma_{\perp}(\mathbf{B}) = \frac{j_x}{E_x} = \frac{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{xy}^2}{\sigma_{xx}}, \quad (7)$$

Отсюда можно выразить и коэффициент магнетосопротивления χ_{\perp} через компоненты тензора $\sigma_{\alpha\beta}$.

Если магнитное поле параллельно полю, то в рассматриваемой модели сила Лоренца не возникает, $\sigma(\mathbf{B}) = \sigma$, и продольное магнетосопротивление $\Delta\rho/\rho = 0$.

в. *Эффект Холла.* При наличии внешнего магнитного поля на движущиеся электроны действует сила Лоренца, перпендикулярная к направлениям их скорости и магнитной индукции. Поэтому движение электронов в различных направлениях

происходит по разному и даже полупроводник, изотропный в отсутствие магнитного поля, становится анизотропным. Это обстоятельство приводит к возникновению гальваномагнитных явлений. Важнейшими из них являются эффект Холла и изменение сопротивления в магнитном поле.

Эффект Холла заключается в том, что в проводнике с током, помещенном в магнитное поле, появляются электродвижущие силы и, как следствие, возникает дополнительное электрическое поле. Сущность этого эффекта в простейшем и наиболее важном случае поясняет рис. 1.

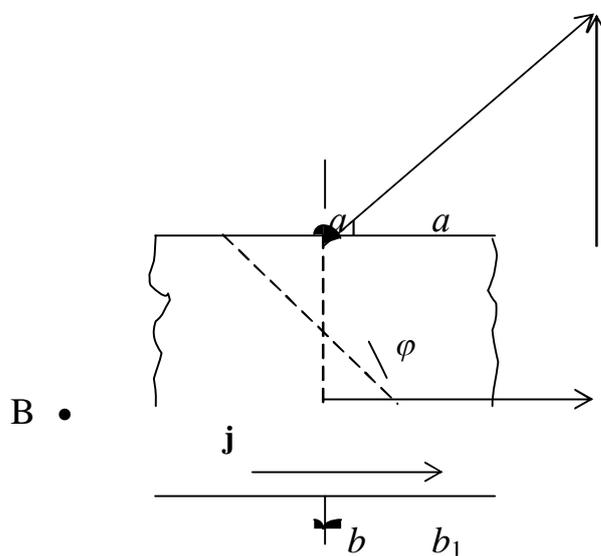


рис. 1

Рассмотрим однородный и изотропный проводник в виде прямоугольного параллелепипеда с электродами на его торцах. Направим прямоугольные оси координат вдоль ребер параллелепипеда и положим что вектор плотности тока \mathbf{j} параллелен оси X, а магнитная индукция \mathbf{B} направлена по оси Z. В отсутствие магнитного поля напряженность электрического поля в проводнике \mathbf{E} совпадает с направлением \mathbf{j} и между двумя поперечными контактами a и b , расположенными в плоскости, перпендикулярной к \mathbf{j} , разность потенциалов равна нулю. При включении поперечного магнитного поля между разомкнутыми контактами a и b появляется

разность потенциалов, которая изменяет знак при изменении направления тока или магнитного поля.

Появление этой разности потенциалов показывает, что в присутствии магнитного поля в проводнике возникает дополнительное электрическое поле E_y . Направление результирующего электрического поля E теперь не совпадает с направлением j , а повернуто относительно j на некоторый угол φ , который получил название угла Холла. Эквипотенциальные поверхности, которые в отсутствие магнитного поля были плоскостями, перпендикулярными к E_x (одна из них проходила через точки a и b), теперь перпендикулярны E , т.е. повернуты тоже на угол φ (a_1b_1 на рис.1).

Опыт показывает, что напряженность поля эффекта Холла E_y и напряжение Холла u можно выразить формулами:

$$E_y = \frac{u}{d} = RBj = RB \frac{i}{ad}$$

(8)

Здесь d - толщина образца, a – его ширина (в направлении магнитного поля), i – полная сила тока, а R – коэффициент пропорциональности, который в слабых магнитных полях не зависит от магнитной индукции и характеризует только свойства вещества. Он получил название постоянной Холла.

Знаки угла Холла и постоянной Холла зависят от знака заряда подвижных частиц, обуславливающих электропроводность. Это пояснит рис.2.

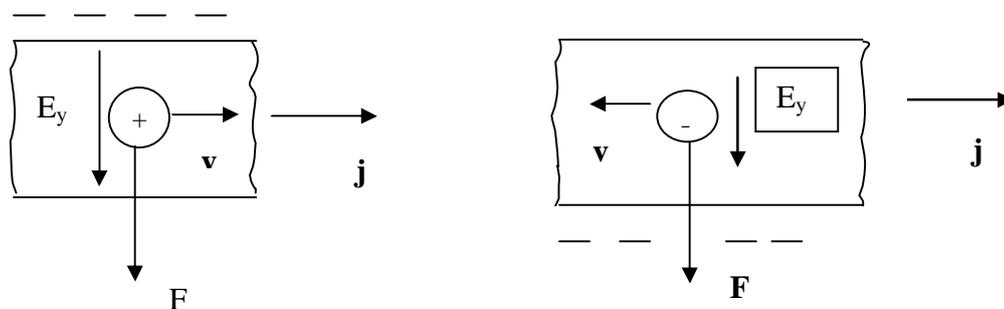




рис. 2.

Знак угла Холла: $\varphi > 0$ (a); $\varphi < 0$ (б)

Если магнитная индукция направлена от плоскости рисунка к читателю и подвижные частицы несут положительный заряд, то при указанном направлении тока сил Лоренца \mathbf{F} будет направлена вниз и нижняя грань кристалла будет заряжаться положительно, а верхняя – отрицательно. Результирующее электрическое поле \mathbf{E} будет повернуто относительно тока \mathbf{j} против часовой стрелки. В этом случае условились считать угол Холла и постоянную Холла положительными.

При отрицательно заряженных частицах сила \mathbf{F} направлена тоже вниз, однако в этом случае нижняя грань кристалла будет заряжаться отрицательно и холловское поле E_y изменит знак. Соответственно поле \mathbf{E} окажется повернутым по часовой стрелке и φ и R будут отрицательны.

Эффект Холла находит себе различные технические применения. Его можно использовать для измерения напряженности магнитного поля или, если последнее известно, для измерения силы тока и мощности. С помощью эффекта Холла можно генерировать, модулировать и демодулировать электрические колебания, осуществлять квадратичное детектирование колебаний, усиливать электрические сигналы и решать другие технические задачи.

Угол Холла и постоянная Холла выражаются непосредственно через компоненты тензора электропроводности в магнитном поле $\sigma_{\alpha\beta}$. Будем считать сначала, что есть носители заряда только одного типа, тогда их скорость дрейфа направлена вдоль тока (оси X, рис.1.), а сила Лоренца и поле Холла лежат в плоскости XY, и в соотношениях (5) $E_z = 0$. Далее, мы сразу учтем, что

$$\sigma_{xy} = -\sigma_{yx}, \quad \sigma_{xx} = \sigma_{yy}. \quad (9)$$

В справедливости первого из этих соотношений можно убедиться прямым расчетом. Второе очевидно без расчета, т.к. оси X и Y равноправны по отношению к **B**. Тогда полагая в (5) $j_y = 0$ (разомкнутые потенциальные зонды *a* и *b*), мы имеем

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{E_y}{E_x} = -\frac{\sigma_{yx}}{\sigma_{yy}} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_{xx}}.$$

(10)

Далее, исключая E_x из первого соотношения (5) и формулы (10) находим

$$E_y = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{xy}^2} j_x.$$

(11)

Сравнивая это с формулой (8), получаем для постоянной Холла

$$R = \frac{1}{B} \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{xy}^2}.$$

(12)

Отметим, что формулы (7), (10) и (12) строго справедливы лишь для безграничной среды. В реальных образцах конечных размеров из – за наличия токоподводящих металлических контактов возникают искажения линий тока и линий поля, которые нужно учитывать при измерениях. Чтобы влияние краевых

эффектов было мало, длина образцов (в направлении тока) должна быть намного больше их поперечных размеров.

2. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ.

Для определения электрических параметров полупроводников существует большое количество методов измерений. Метод Ван – дер – Пау применяется для измерения электропроводности и эффекта Холла тонких слоев полупроводника, расположенных на изолирующем слое или изолирующей подложке. Изолирующий слой необходим, чтобы исключить влияние проводящей подложки на процесс измерения. Часто в качестве слоя используется обедненная область полупроводника, возникающая автоматически, если подложка имеет противоположный тип проводимости.

Метод Ван – дер – Пау позволяет использовать образцы простой формы (квадратные или круглые) с минимальным количеством омических контактов (обычно четыре контакта). В настоящей работе используется образец квадратной формы с четырьмя омическими контактами (рис.3). Одна пара контактов служит для подвода тока, другая пара – для измерения напряжения или ЭДС. Чтобы устранить ошибки и повысить точность, измерения проводят несколько раз (минимум два раза), меняя пары контактов (рис.4).

При измерении удельного сопротивления ток I пропускается через два соседних контакта (сначала через контакты 0; 3, а затем через контакты 0; 1), а другие два контакта используются для измерения напряжения U (сначала контакты 1; 2, а затем контакты 2; 3). Удельное сопротивление вычисляется по формулам:

$$\rho = Uha/J,$$

$$U = (U_1 + U_2)/2$$

(13)

Рис. 3. Образец полупроводника для измерения параметров по методу Ван – дер – Пау. Обозначения: Пл – пленка n-типа, П – подложка p-типа, И – изолирующий слой (обедненная область), 0,1,2,3 – омические контакты из индия, d – длина стороны образца, c – расстояние между омическими контактами.

Рис. 4. Схемы включения контактов образца при измерении электропроводности (а, б) и эффекта Холла (в, г) по методу Ван – дер – Пау, где h – толщина измеряемой пленки полупроводника, a – поправочный коэффициент (определяется из графика рис. 5 по заданному d/c для конкретного образца), индексы 1, 2 относятся к первому и второму измерениям соответственно.

При измерении эффекта Холла ток J пропускается через два противоположных контакта (сначала контакты 0,2, затем контакты 1,3), а измерение ЭДС Холла U_x производится на другой паре контактов (сначала контакты 1,3, затем 0,2). Постоянная Холла вычисляется по формулам:

$$R_x = U_x h 10^8 / J H b, \quad U_x = (U_{x1} + U_{x2}) / 2,$$

(14)

где H – напряженность магнитного поля (в эрстедах),

b – поправочный коэффициент (определяется из графика рис.5 по заданному отношению d/c для данного конкретного образца),

1,2 – индексы, относятся к первому и второму измерениям соответственно.

Расчет концентрации n основных носителей заряда и их подвижности в измеряемой пленке проводится по обычным формулам:

$$n = 1/eR_x, \quad \mu = R_x/\rho,$$

(15)

где e – заряд электрона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл).

3. ОПИСАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схематическое устройство измерительной установки представлено на рис.6. Установка включает: пульт управления 1, образец с держателем 2, постоянный подковообразный магнит 3, источник питания 4 и измеритель напряжений 5.

Пульт управления предназначен для подключения измеряемого образца к схемам измерения и подачи тока и для проведения необходимых коммутаций (переключения полярностей подводимого тока и измеряемого напряжения U , переключения контактов образца по разным схемам измерения). На пульте управления имеются клеммы “J” для подключения источника питания, обеспечивающего подачу тока на образец; клеммы 0, 1, 2, 3, для подключения образца с держателем; клеммы “U” для подключения измерителя напряжения, два

тумблера: тумблер “J” для переключения полярности подводимого тока и тумблер “U” для переключения полярности измеряемого напряжения.

Коммутация омических контактов образца осуществляется пакетным переключателем рода работ в соответствии со схемами переключения, представленными на рис.4. Ручка переключателя рода работ выведена на лицевую панель с обозначениями. Положения “ ρ_1 ” и “ ρ_2 ” соответствуют измерениям удельного сопротивления по схемам “а” и “б” рис.4, а положения “ X_1 ” и “ X_2 ” соответствуют измерениям ЭДС Холла по схемам “в” и “г” рис.4.

Образец в виде квадрата с четырьмя омическими контактами из индия, нанесенными на пленку полупроводника по схеме рис.3, закреплен в держателе из текстолита или гетинакса. Подвод тока и присоединение к измерительной схеме осуществляется с помощью четырех пружинящих контактов в виде лепестков. Гибкими проводниками контакты соединяются с кабелем, выводы которого подключаются к клеммам 0, 1, 2, 3 на пульте управления.

Источник питания может быть любого типа. Он должен обеспечивать постоянное стабилизированное напряжение в несколько вольт при токе 20 – 50 мА. В данной установке используется источник питания типа УНИП – 5, позволяющий подавать регулируемое напряжение 0,5 – 15 В при токах до 0,3 А. Источник подключается к клеммам “J” на пульте управления миллиамперметра типа Ц4311 или через другой измеритель тока со шкалой 50 – 150 мА. Для плавной регулировки тока в цепь включают магазин сопротивления Р33 или другое переменное сопротивление величиной 20 – 200 Ом. Измерения напряжения U , ЭДС Холла U_x в установке производится с помощью вольтметра.

Рис. 5. Графики для определения поправочных коэффициентов a и b в зависимости от отношения d/c (d – длина стороны образца, c – расстояние между омическими контактами).

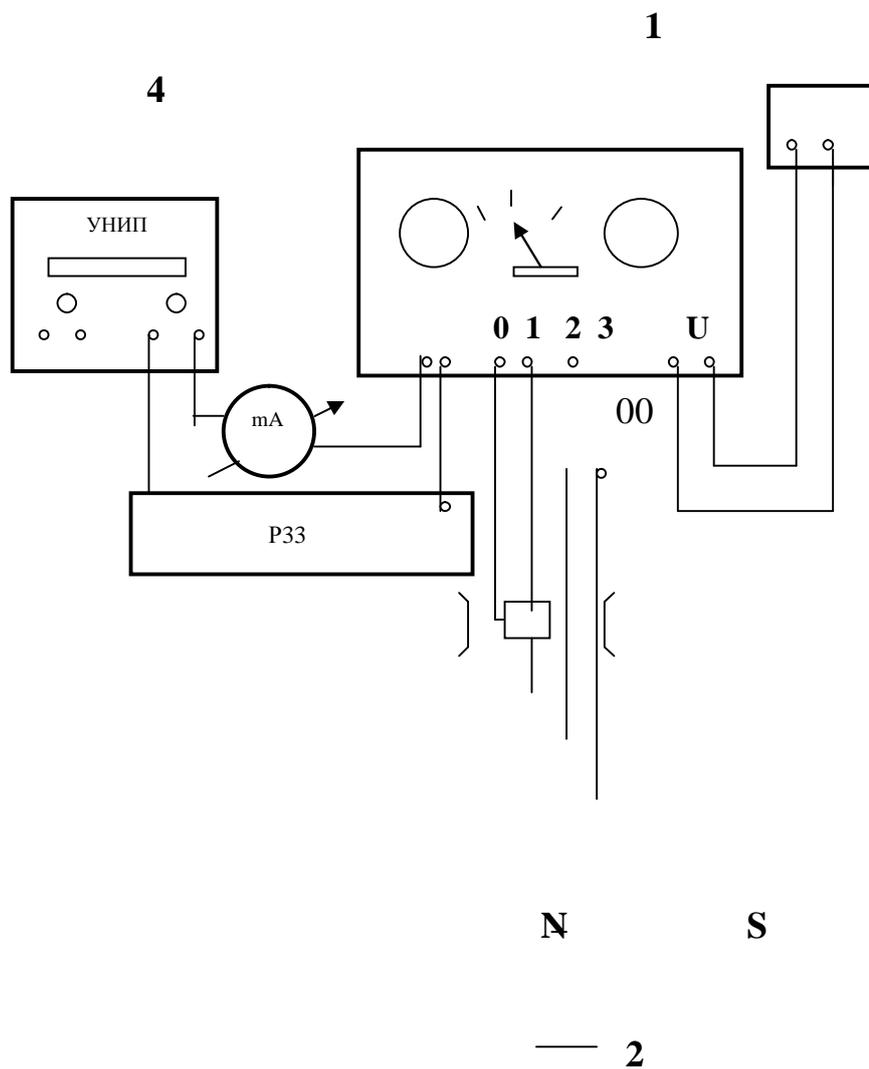


Рис. 6. Схематическое устройство лабораторной установки для измерения параметров полупроводников по методу Ван – дер – Пау. Обозначения:

1. Пульт управления.
2. Образец с держателем.
3. Постоянный магнит.
4. Источник питания.
5. Мультиметр.

4. ЗАДАНИЕ.

1. Провести измерение основных параметров полупроводниковой пленки из арсенида галлия на одном образце при комнатной температуре при трех различных токах. Рассчитать концентрацию и подвижность основных носителей и сравнить результаты данным, полученным другим методами. Объяснить полученные расхождения.
2. Провести измерения основных параметров полупроводниковых пленок на арсениде галлия при комнатной температуре на образцах различных размеров, но выполненных из одного материала. Провести расчет подвижности и концентрации основных носителей и сравнить полученные на разных образцах данные. Объяснить наблюдаемые расхождения.
3. Провести измерения основных параметров полупроводника при комнатной температуре методом Ван – дер – Пау на пленках различной толщины. Сравнить полученные результаты и объяснить их.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.

1. Собрать измерительную установку и приготовить ее к работе.
2. Взять у преподавателя образцы для измерений, измерить их размеры (длину стороны d , расстояние между контактами s , толщину пленки h). Занести данные в таблицу.
3. Вставить образец в держатель, поместить держатель между полюсами магнита, подать необходимый ток на образцы (20 – 40 мА) и провести измерения напряжений U и ЭДС Холла U_x по двум схемам включения при двух различных полярностях тока. Результаты занести в таблицу.
4. Произвести вычисления основных параметров образцов по формулам (13), (14), (15) и результаты занести в таблицу. Рассчитать ошибки измерения основных параметров.

Рекомендуемый вид таблицы экспериментальных и расчетных данных:

$h = 0,6$ мм; $c = 2,3$ мм; $d = 5$ мм; $H = 2700$ эрстед ($B = 0,37$ Тл)

d/c	a	b	J мА	U ₁ В	U ₂ В	U _{ср} В	U _{x1} В	U _{x2} В	U _x В	R _x см ⁻³ ³ /Кл	n см ⁻³	ρ О м см	μ см ² / В сек
-----	---	---	---------	---------------------	---------------------	----------------------	----------------------	----------------------	---------------------	--	-----------------------	-------------------	---------------------------------------

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Перечислите достоинства и недостатки метода Ван – дер – Пау.
2. Напишите формулы для расчета основных параметров полупроводника по методу Ван – дер – Пау.
3. Нарисуйте схематическое строение измерительной установки и объясните назначение ее основных частей.
4. Расскажите методику измерения и порядок работы.
5. Как производится расчет ошибок измерения в данной работе?
6. Изложите правила техники безопасности, которые нужно соблюдать в данной работе.

7. ЛИТЕРАТУРА.

1. Спецпрактикум по физике. В. В. Остроградский, В. Д. Егорова
2. Практикум по полупроводникам и полупроводниковым приборам под ред. Шалимовой.
3. Бонч – Бруевич В. Л., Калашников С.Г. “Физика полупроводников”

