

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Махмудиан Мехрдад

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Определение концентрации и подвижности носителей заряда в
полупроводниковой плёнке методом Ван дер Пау.**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19310

Научный руководитель:

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

Аннотация

Работа посвящена изучению сопротивления тонкой проводящей полупроводниковой плёнки квадратной формы методом Ван дер Пау в магнитном поле, перпендикулярном плёнке. Измерения проводились методом синхронного детектирования малых сигналов на переменном возбуждающем сигнале в условиях низких температур четырёхзондовым методом. Получены магнетополевые зависимости сопротивления образца. Из измерений найдены концентрация и подвижность носителей заряда.

Оглавление

Аннотация	2
Введение	4
Постановка задачи	8
Описание экспериментальной установки	9
Результаты эксперимента и обработка данных	10
Вывод	13
Список литературы	14

Введение

При помещении проводника в постоянные электрическое и магнитное поля возникает поперечная разность потенциалов. Это явление называется эффектом Холла. Поперечная разность потенциалов – холловское напряжение.

Через проводящую плёнку в магнитном поле с индукцией B течёт электрический ток с плотностью j под действием электрического поля напряжённости E . Магнитное поле отклоняет носителей заряда к одной из граней бруска вдоль или против электрического поля.

Возникшая сила Лоренца приведёт к накоплению зарядов возле граней плёнки: положительного возле одной, отрицательного возле другой. Заряд перестанет накапливаться, пока возникшее электрическое поле вследствие накопления зарядов E' не скомпенсирует силу Лоренца:

$$eE' = evB \Rightarrow E' = vB ,$$

где e — заряд электрона, v - его скорость.

Эта скорость выражается через плотность тока:

$$v = \frac{j}{ne} ,$$

где n — концентрация носителей заряда.

Тогда:

$$E' = \frac{1}{ne} jB .$$

Коэффициент $R_H = \frac{1}{ne}$ называется коэффициентом Холла.

Метод Ван дер Пау используется для нахождения двумерного удельного сопротивления и коэффициента Холла любого материала, проводящего ток.

Имеется плоскость с двумерной проводимостью σ^* . Контакты 1, 2, 3 и 4 расположены в вершинах произвольного четырёхугольника с известными сторонами.

В методе используется четырёхточечное сопротивление $R_{12,34}$, которое определяется как отношение разности потенциалов между контактами 3 и 4 U_{34} к току I , пропускаемому между контактами 1 и 2.

$$U_{34} = -\frac{I}{2\pi\sigma^*} \ln\left(\frac{e}{d}\right) - \frac{I}{2\pi\sigma^*} \ln\left(\frac{f}{b}\right).$$

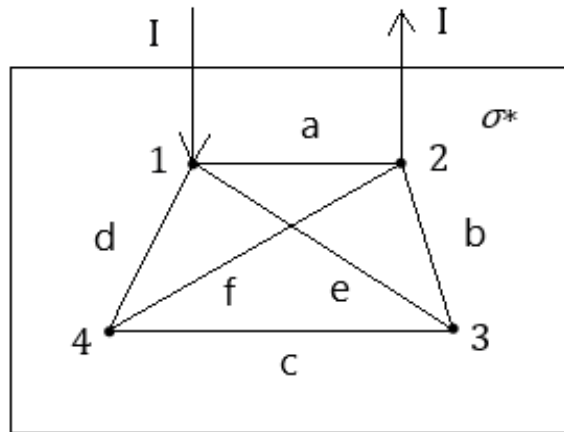


Рисунок 1. Плоскость с контактами.

Поделив U_{34} на ток I , получим:

$$R_{12,34} = \frac{1}{2\pi\sigma^*} \ln\left(\frac{ef}{bd}\right) \quad (1)$$

Аналогично находится четырёхточечное сопротивление $R_{23,14}$:

$$R_{23,14} = \frac{1}{2\pi\sigma^*} \ln\left(\frac{ef}{ac}\right) \quad (2)$$

Из соотношений (1) и (2) получим:

$$e^{-2\pi\sigma^*R_{12,34}} + e^{-2\pi\sigma^*R_{23,14}} = \frac{ac + bd}{ef} \quad (3)$$

Соотношение (3) равно 1, если все четыре контакта находятся на одной окружности. У нас полупроводниковая плёнка квадратная, поэтому в нашем случае будем пользоваться соотношением:

$$e^{-2\pi\sigma^*R_{12,34}} + e^{-2\pi\sigma^*R_{23,14}} = \frac{ac + bd}{ef} = 1 \quad (4)$$

Полуплоскость можно отобразить в замкнутую область. При этом все четыре контакта на полуплоскости переходят на поверхность замкнутой области. Для полуплоскости соотношение (4) примет вид:

$$e^{-\pi\sigma^*R_{12,34}} + e^{-\pi\sigma^*R_{23,14}} = 1. \quad (5)$$

Из этого соотношения определяется двумерная проводимость полупроводниковой плёнки σ^* .

Далее из связи проводимости и подвижности носителей заряда находим:

$$\sigma^* = ne\mu \Rightarrow \mu = \frac{\sigma^*}{ne} = R_H \sigma^*. \quad (6)$$

В данном эксперименте будут измеряться малые сигналы (напряжения), которые будут возникать вследствие пропускания малых токов.

Метод синхронного детектирования используется для регистрации слабого сигнала, исключая помехи и шумы. Этот метод основан на операции умножения сигналов. На умножитель синхронного детектора подаются два гармонических сигнала: опорный сигнал с постоянной частотой и амплитудой (выход генератора) и переменный сигнал. Выходной сигнал является гармоническим сигналом с суммарными и разностными частотами.

В результате умножения сигналов, когда частоты переменного и опорного сигналов равны, появится составляющая с нулевой разностной частотой – постоянная составляющая. На выход из фильтра низких частот пойдёт только эта постоянная составляющая.

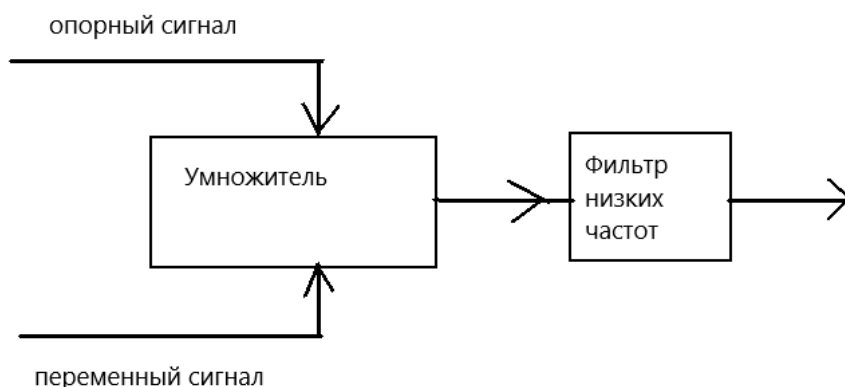


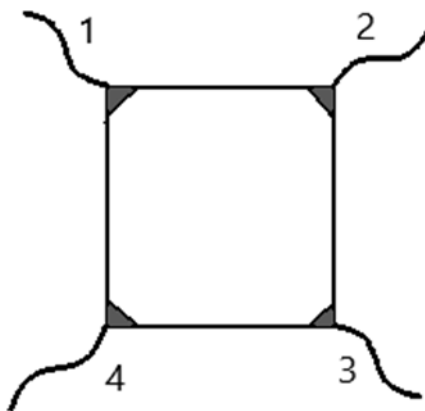
Рисунок 2 Схема синхронного детектора.

Необходимость пропускания малого тока связано с тем, что в обратном случае, при пропускании большого тока, образец будет греться за счёт выделяющегося джоулева тепла. Расстояние между уровнями размерного квантования составляет несколько десятков мэВ. Соответственно, при возникновении в образце напряжений, превышающих десятки мВ, будут наблюдаться нелинейные эффекты, и результаты измерений будут некорректными.

Поэтому в данном эксперименте через образец пропускались малые токи при низкой температуре. В качестве среды с низкой температурой был выбран жидкий гелий при температуре 4.2К.

Постановка задачи

Имеется образец – квадратная полупроводниковая плёнка с четырьмя контактами в углах.



Необходимо для данного образца рассчитать концентрацию носителей заряда и их проводимость.

Описание экспериментальной установки

Установка состоит из криостата, двух соосных катушек, синхронного усилителя, генератора, зонда, приемника сигнала.

Сначала экран криостата заливается жидким азотом, для улучшения теплоизоляции, затем уже внутренний сосуд наполняется жидким гелием.

Затем полупроводниковая плёнка монтируется на зонд, который соединен с пронумерованными контактами, и помещается в трубку криостата. С помощью синхронного детектора через контакты пропускается переменный ток с амплитудой 10^{-5} А.

Генератор подает ток на катушки, вследствие чего возникает магнитное поле, параллельное их осям.

Далее, в зависимости от магнитного поля находим сопротивление плёнки.

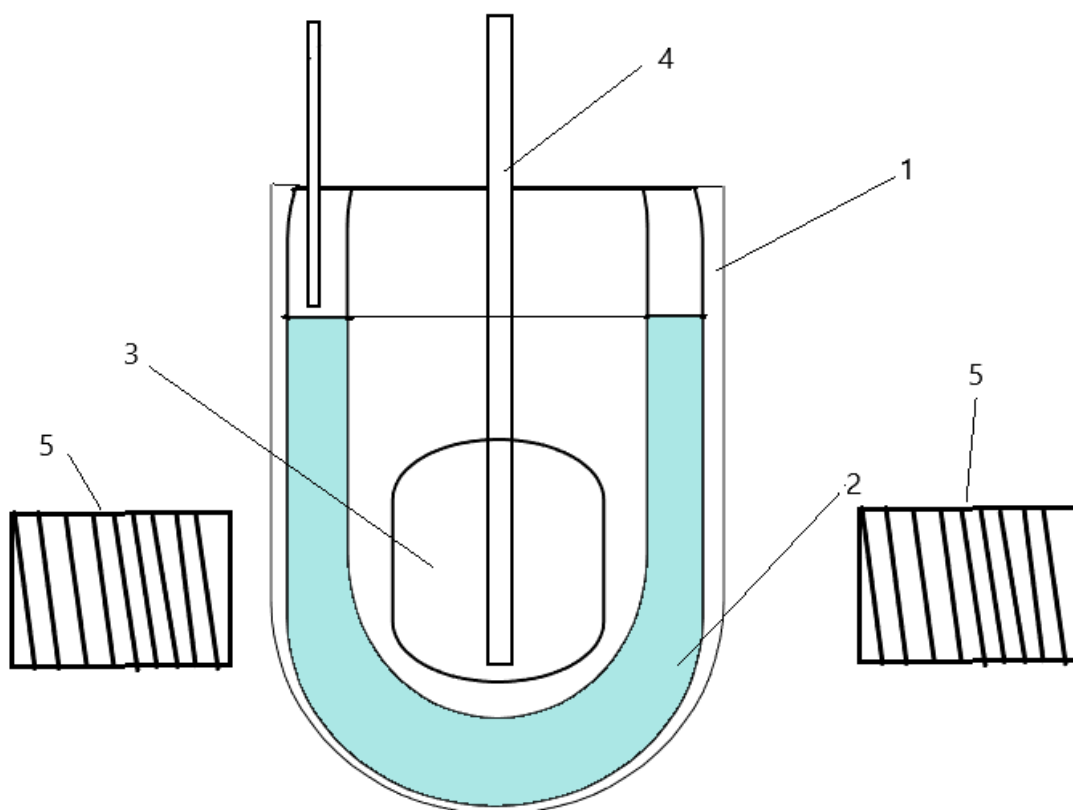


Рисунок 3. Криостат с гелием. 1 – вакуумная рубашка, 2 – экран, 3 – внутренний сосуд, 4 – трубка криостата, 5 - катушки.

Результаты эксперимента и обработка данных

Ниже представлены графики зависимостей сопротивлений от магнитного поля:

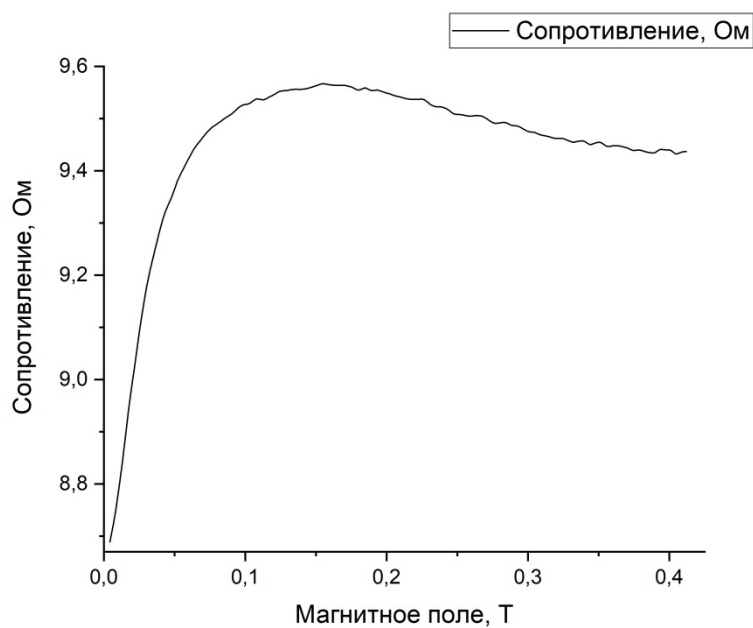


График 1. Зависимость сопротивления $R_{12,34}$ от магнитного поля.

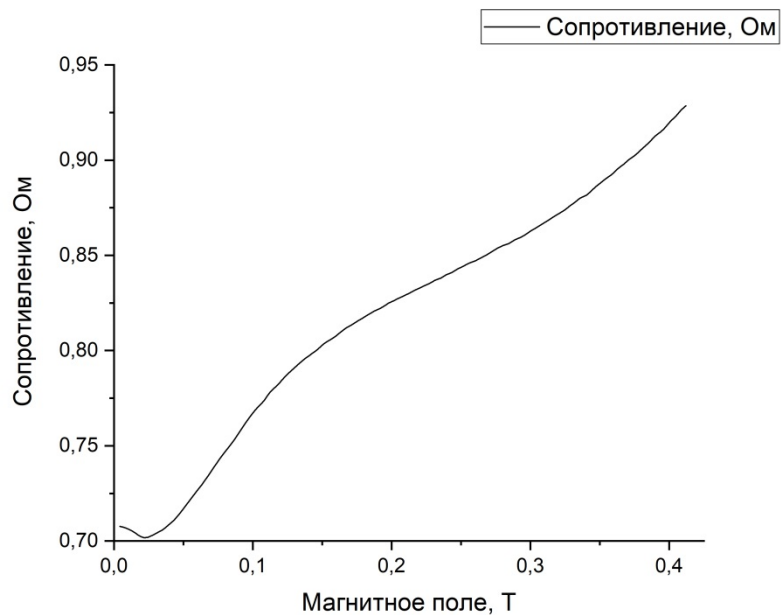


График 2. Зависимость сопротивления $R_{23,41}$ от магнитного поля.

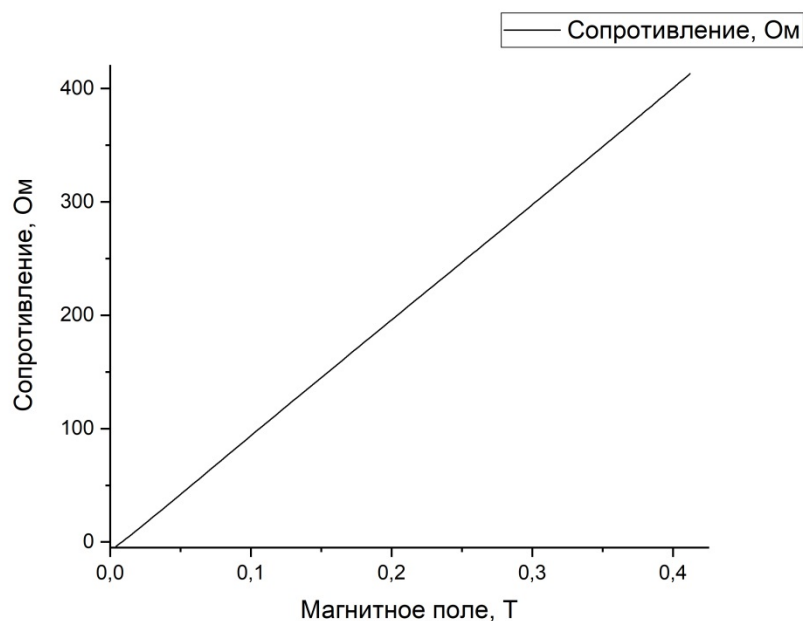


График 3. Зависимость сопротивления $R_{13,24}$ от магнитного поля.

С помощью графика 3 определим константу Холла нашего полупроводника:

$$R_H = \frac{\Delta R_{13,24}}{\Delta B} = \frac{416.91}{0.41} \approx 1016.85 \frac{\text{Ом}}{\text{Т}}.$$

Откуда сразу можно найти концентрацию носителей заряда:

$$R_H = \frac{1}{ne} \Rightarrow n = \frac{1}{R_H e} = \frac{1}{1016.85 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}} \approx 6.1 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}.$$

Двумерная проводимость определяется из формулы (4):

$$e^{-\pi\sigma^* R_{12,34}} + e^{-\pi\sigma^* R_{23,14}} = 1.$$

Подвижности носителей заряда находим по формуле (6):

$$\sigma^* = ne\mu \Rightarrow \mu = \frac{\sigma^*}{ne} = R_H \sigma^*$$

	$R_{23,41}, \text{ Ом}$	$R_{12,34}, \text{ Ом}$	$\sigma^*, \text{ Ом}^{-1}$	$\mu, \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$	$\mu_{\text{ср}}, \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$
1	0,7077	8,689	0.0706	71.84	68.58
2	0,7068	8,752	0.0703	71.52	
3	0,7052	8,84	0.0699	71.09	
4	0,7032	8,938	0.0694	70.62	
5	0,7017	9,025	0.0690	70.20	
6	0,7024	9,108	0.0685	69.75	
7	0,704	9,178	0.0681	69.34	
8	0,7057	9,233	0.0678	69.00	

9	0,7082	9,28	0.0675	68.67
10	0,711	9,32	0.0672	68.40
11	0,7148	9,348	0.0670	68.15
12	0,7188	9,38	0.0667	67.87
13	0,723	9,404	0.0665	67.62
14	0,7272	9,427	0.0662	67.39
15	0,7313	9,447	0.0660	67.17
16	0,7357	9,461	0.0658	66.97
17	0,7405	9,476	0.0656	66.76
18	0,7449	9,486	0.0654	66.59
19	0,7489	9,494	0.0653	66.43
20	0,7529	9,502	0.0651	66.28

Погрешность измерений подвижности носителей определяются как среднеквадратические отклонения по формуле:

$$\Delta x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n=20} (x_i - x_{cp})^2}{n-1}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta \mu = 1.8 \frac{M^2}{B \cdot c}$$

С учётом погрешности, подвижность носителей заряда:

$$\mu = (68.6 \pm 1.8) \frac{M^2}{B \cdot c}$$

Выводы

В ходе выполнения курсовой работы был освоен метод синхронного детектирования малых сигналов при низких температурах. Найдены концентрация и подвижность носителей заряда полупроводниковой плёнки квадратной формы. Полученные данные, согласно литературным источникам, соответствуют исследуемой системе, что свидетельствует в пользу выбранного метода.

Список литературы

1. А.Г. Погосов. Лекции по электродинамике: метод Ван дер Пау;
2. Википедия. Эффект Холла;
3. Степанов А.В. Синхронный детектор. 1997;
4. Эдельман В.С. Вблизи абсолютного нуля. Библиотечка «Квант», 1983.
Выпуск 26.