

В.А.Антропов,

Л.Х.Антропова

Применение гальваномагнитных явлений в полупроводниках для
создания приборов и устройств СВЧ диапазона

Пенза, ПГУ, 2011год

Оглавление.

Введение.....	4
1.Глава первая. Гальваномагнитные явления в полупроводниках.....	6
1.1. Эффект Холла в полупроводниках.	6
1.2. Магниторезистивный эффект или эффект Гаусса.	11
ГЛАВА 2. Некоторые вопросы разработки устройств на основе гальваномагнитных явлений.	16
2.1.Параметры устройств и обоснование выбора полупроводниковых материалов для их изготовления.	16
2.3. Технология изготовления кристаллических датчиков Холла.....	36
2.4. Экспериментальное исследование параметров плёночных датчиков Холла, используемых для измерения магнитных полей. .	63
2.5.Термостабильный зонд из кристаллических датчиков Холла для измерения напряжённости продольных магнитных полей.	70
2.6. Высокочувствительный охлаждаемый датчик Холла из сурьмянистого индия для измерения магнитных полей.	73
Глава 3. Приборы и устройства, использующие гальваномагнитные эффекты в диапазоне СВЧ.	77
3.1 Эффект Холла в диапазоне СВЧ.	77
3.2 Решение уравнения движения носителей зарядов для гармонических полей.	79
3.3 Ток смещения и поверхностный эффект.....	83

3.4 Особенности использования эффекта Холла в диапазоне СВЧ.....	85
3.5 Основные характеристики датчиков Холла в диапазоне СВЧ.....	87
3.6. Некоторые вопросы методики измерения эффекта Холла на СВЧ.	96
3.7 Карманный дозиметр СВЧ излучения.	100
3.8 Ваттметр на эффекте Холла для контроля больших уровней импульсной проходящей мощности СВЧ.....	106
3.9 Способы повышения чувствительности датчиков Холла на СВЧ.	110
3.10 Измеритель модулированной плотности потока мощности СВЧ.	114
3.11 Миниатюрный измеритель плотности потока мощности СВЧ диапазона на основе пленочных датчиков Холла.	116
3.12 Автоматический регистратор проходящей мощности СВЧ диапазона на эффекте Холла.	117
3.13 Измеритель проходящей мощности модулированного СВЧ излучения с регулируемой чувствительностью.....	118
3.14 Использование эффекта магнитосопротивления для измерения проходящей мощности СВЧ.....	122
ГЛАВА 4. Дифракция электромагнитных волн на датчике Холла.....	128
4.1 Решение задачи о дифракции электромагнитных волн СВЧ диапазона на датчике Холла.	128

4.2	Расчёт токов и полей на поверхности датчиков Холла и экспериментальное исследование их параметров.	132
4.3	Экспериментальная проверка частотной зависимости чувствительности датчиков Холла	135
4.4	Экспериментальная проверка точности датчиков Холла.	138
4.5	Экспериментальное исследование распределения плотности потока мощности СВЧ в волноводе и в ближней зоне рупора двухэлектродным датчиком Холла.	143
4.6	Поляриметр СВЧ диапазона.	150
Глава 5.	Радиовидение.	155
5.1.	Основная проблема радиовидения.	157
5.2.	Блок-схема системы радиовидения.	158
5.3.	Многоэлементная структура на датчиках Холла.	160

Введение.

Одной из важных проблем радиоэлектроники является измерение параметров магнитных полей, а также параметров магнитопроводящих сред, в диапазоне частот от нуля до сверхвысоких частот и исследование электромагнитного излучения и его взаимодействия с веществом.

Помимо измерения мощности СВЧ излучения всё возрастающее значение приобретает исследование структуры электромагнитного поля, то есть измерение напряжённостей электрического и магнитного компонентов поля как функций от координат точки наблюдения. Особую важность исследование структуры электромагнитного поля приобрело в связи с появлением новых разделов радиоэлектроники, таких как радио-интроскопия и радио-

видение, а также широкое проникновение методов голографии в микроволновую технику. Многообразие физических явлений в полупроводниках существенно способствовало использованию их в измерительной технике СВЧ диапазона.

Анализ распределения амплитуд, фаз и поляризаций электромагнитного поля СВЧ в некоторой конечной области пространства является довольно сложной задачей. Значительные математические трудности определения тонкой структуры электромагнитного поля, особенно в фокальной области и ближней зоне, выдвигают на первый план экспериментальные методы исследования. Возможно даже, что создание хороших экспериментальных методов анализа тонкой структуры поля канализирующих, излучающих и приёмных систем будет способствовать и теоретическому решению вопроса.

Однако, решить эту задачу с помощью обычных антенн СВЧ диапазона затруднительно, пожалуй, даже невозможно, поскольку все эти антенны являются пространственно-усредняющими. Это связано с тем, что размеры эффективно работающих антенн СВЧ превосходят или, в крайнем случае, сравнимы с длиной волны электромагнитного излучения. С середины 20-го века всё большее применение как для индикаций мощности СВЧ диапазона, так и для исследования структуры СВЧ полей находят гальваномагнитные эффекты в полупроводниках.

По сравнению с некоторыми другими методами гальваномагнитные датчики имеют явные преимущества [1]:

1. линейная связь ЭДС Холла с величиной мощности электромагнитного излучения до весьма больших уровней мощности;
2. широкий частотный диапазон использования, частотная зависимость чувствительности датчика начинает проявляться лишь тогда, когда длина датчика становится больше, чем половина длины волны;

3. безинерционность датчиков Холла в диапазоне СВЧ;
4. возможность индцирования различных уровней мощности электромагнитного излучения на расстоянии порядка толщины датчика;
5. возможность повышения чувствительности датчиков Холла путём охлаждения их до температуры 70-100 К. При этом чувствительность их повышается на два порядка;
6. простота измерительной схемы;
7. малая величина искажений, вносимых датчиком в исследуемое электромагнитное поле;
8. малый уровень собственных шумов датчика Холла. Мощность их собственных шумов имеет порядок величины $(10^{-17}-10^{-19})$ Вт/Гц;
9. высокая надёжность датчиков Холла.

Всё вышесказанное позволяет сделать вывод, что гальваномагнитные датчики являются весьма перспективными чувствительными элементами различных СВЧ устройств. Это стало возможным в связи с появлением и исследованием полупроводниковых материалов типа A_3B_5 . Благодаря рекордно высокой подвижности носителей заряда (электронов), особенно в антимониде индия $InSb$, проявление гальваномагнитных явлений становится более существенным.

1.Глава первая. Гальваномагнитные явления в полупроводниках.

1.1. Эффект Холла в полупроводниках.

Рассмотрим теорию эффекта Холла по результатам работы [2] в условиях параболичности зон и при малой концентрации примесей, когда доминирующим механизмом рассеяния является рассеяние на тепловых колебаниях решётки (фононах).

В стационарном состоянии при наличии внешних электрического и магнитного полей кинетическое уравнение имеет вид:

$$\vec{v} \nabla_r f - \frac{2\pi \cdot e}{h} (\vec{E} + [\vec{v} \times \vec{B}]) \nabla_k f = \frac{1}{\tau} \cdot \frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} \bar{\chi}(\varepsilon) \cdot \vec{k}, \quad (1.1)$$

где \vec{r} - радиус – вектор носителя заряда,

h - постоянная Планка,

\vec{k} - волновой вектор носителя заряда,

f - функция распределения носителей заряда,

f_0 - функция распределения носителей заряда в стационарном состоянии,

ε - энергия носителя заряда,

$\bar{\chi}$ - некоторая функция энергии носителя заряда,

τ - время релаксации носителя заряда,

\vec{v} - скорость носителя заряда.

Решение этого уравнения в приближении слабого отличия f от f_0

дает в общем случае:

для электронов

$$\bar{\chi}_n(\varepsilon) = -\frac{h\tau_n}{2\pi m_n^*} \left[\frac{\left\{ \frac{\varepsilon - \zeta}{T} \nabla T + \nabla(\zeta - e\varphi) \right\} + \left(\frac{e\tau}{m_n^*} \right) \left[\vec{B} \left\{ \frac{\varepsilon - \zeta}{T} \nabla T + \nabla(\zeta - e\varphi) \right\} \right]}{1 + \left(\frac{e\tau_n \vec{B}}{m_n^*} \right)^2} + \frac{\left(\frac{e\tau_n}{m_n^*} \right)^2 \left(\vec{B} \left\{ \frac{\varepsilon - \zeta}{T} \nabla T + \nabla(\zeta - e\varphi) \right\} \right) \vec{B}}{1 + \left(\frac{e\tau_n \vec{B}}{m_n^*} \right)^2} \right], \quad (1.2)$$

где τ_n - время релаксации электронов;

φ - электростатический потенциал;

T - абсолютная температура;

ξ - уровень электрохимического потенциала.

Для дырок

$$\bar{\chi}_p(\varepsilon) = -\frac{h\tau_p}{2\pi m_p^*} \left[\frac{\left\{ \frac{\varepsilon + \varepsilon_g + \zeta}{T} \nabla T - \nabla(\zeta - e\varphi) \right\} - \left(\frac{e\tau_p}{m_p^*} \right) \left[\bar{B} \left\{ \frac{\varepsilon + \varepsilon_g + \zeta}{T} \nabla T - \nabla(\zeta - e\varphi) \right\} \right]}{1 + \left(\frac{e\tau_p \bar{B}}{m_p^*} \right)^2} + \frac{\left(\frac{e\tau_p}{m_p^*} \right)^2 \left(\bar{B} \left\{ \frac{\varepsilon + \varepsilon_g + \zeta}{T} \nabla T - \nabla(\zeta - e\varphi) \right\} \right) \bar{B}}{1 + \left(\frac{e\tau_p \bar{B}}{m_p^*} \right)^2} \right] \quad (1.3)$$

где τ_p - время релаксации дырок,

m_p^* - эффективная масса дырок,

ε_g - ширина запрещенной зоны полупроводника.

Поскольку мы рассматриваем эффект Холла при постоянной температуре ($\nabla T = 0$) и в слабых полях, когда $\mu B \ll 1$, то выражения (1.2) и (1.3) можно значительно упростить. Здесь μ - подвижность носителя заряда, B - магнитная индукция. Условие слабого поля подразумевает, что длина свободного пробега носителя заряда λ значительно меньше радиуса кривизны его траектории $\lambda_{n,p} \ll R$, т.е. $v_{n,p} \cdot \tau_{n,p} \ll R$ или $\tau_{n,p} \ll \frac{R}{v_{n,p}}$.

Разлагая (1.2) в ряд по малому параметру μB при $\nabla T = 0$ и ограничиваясь слагаемыми первого порядка малости, получим

$$\bar{\chi}_n(\varepsilon) = -\frac{eh\tau_n}{2\pi m_n^*} \left\{ \bar{E} + \left(\frac{e\tau_n}{m_n^*} \right) [\bar{B} \times \bar{E}] \right\} \quad (1.4)$$

Аналогично для дырок

$$\bar{\chi}_p(\varepsilon) = -\frac{eh\tau_p}{2m_p^* \pi} \left\{ \bar{E} - \left(\frac{e\tau_p}{m_p^*} \right) [\bar{B} \times \bar{E}] \right\}, \quad (1.5)$$

$$\bar{E} = -grad\varphi = -\nabla\varphi.$$

Полный ток электронов и дырок, как известно из теории кинетических явлений, определяется выражением

$$\begin{aligned} \bar{j} = & -\frac{1}{(2\pi)^{3/2}} \frac{n_n e \hbar^4}{(m_n^* k_0 T)^{5/2}} \iiint \exp\left(-\frac{\hbar^2 k^2}{2m_n^* k_0 T}\right) (\bar{\chi}_n \cdot \bar{k}) \cdot \bar{k} \cdot d^3 k + \\ & + \frac{1}{(2\pi)^{3/2}} \cdot \frac{p_n e \hbar^4}{(m_p^* k_0 T)^{5/2}} \iiint \exp\left(-\frac{\hbar^2 k^2}{2m_p^* k_0 T}\right) (\bar{\chi}_p \cdot \bar{k}) \cdot \bar{k} \cdot d^3 k \end{aligned} \quad (1.6)$$

где k_0 - постоянная Больцмана,

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}.$$

С учетом (1.4) и (1.5) выражение (1.6) принимает вид

$$\bar{j} = e(n_n \mu_n + p_n \mu_p) \bar{E} + \frac{3\pi e}{8} (n_n \mu_n^2 - p_n \mu_p^2) [\bar{B} \times \bar{E}] \quad (1.7)$$

Это простое выражение было получено с учетом зависимости подвижности от времени релаксации в виде $\mu \approx \tau$, что соответствует рассеянию носителей заряда на тепловых колебаниях решетки.

Определим составляющие полного тока по направлениям.

$$j_x = e(n_n \mu_n + p_n \mu_p) E_x - \frac{3\pi e}{8} (n_n \mu_n^2 - p_n \mu_p^2) B E_y \quad (1.8)$$

$$j_y = e(n_n \mu_n + p_n \mu_p) E_y + \frac{3\pi e}{8} (n_n \mu_n^2 - p_n \mu_p^2) B E_x \quad (1.9)$$

Решая эти уравнения относительно E_y , определим холловское поле.

Решение системы уравнений значительно упростится, если предположить, что скорость поверхностной рекомбинации равна нулю, т.е., что поперечная составляющая электрического поля равна нулю, поскольку при отсутствии рекомбинации носителей заряда на поверхности изменения количества зарядов после их разделения не происходит. В этом приближении напряжённость холловского поля равна

$$E_y = \frac{3\pi}{8e} \cdot \frac{p_n \mu_p^2 - n_n \mu_n^2}{(p_n \mu_p + n_n \mu_n)^2} jB,$$

где $j = \frac{I}{bd}$.

Отсюда ЭДС Холла

$$U_H = bE_y = \frac{3\pi}{8e} \cdot \frac{(p_n \mu_p^2 - n_n \mu_n^2)}{(p_n \mu_p + n_n \mu_n)^2} \cdot \frac{IB}{d} = R_H \frac{IB}{d}, \quad (1.10)$$

где постоянная Холла равна

$$R_H = \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{1}{e} \cdot \frac{(p_n \mu_p^2 - n_n \mu_n^2)}{(p_n \mu_p + n_n \mu_n)^2}. \quad (1.11)$$

Из последней обобщенной формулы для постоянной Холла (1.11) легко получить, что при $n_n \gg p_n$, $p_n \mu_p^2 \ll n_n \mu_n^2$, она принимает вид

$$R_H = \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{1}{e} \cdot \frac{n_n \mu_n^2}{n_n^2 \mu_n^2} = \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{1}{en_n} = A \cdot \frac{1}{en_n}, \quad (1.12)$$

где $A = \frac{3\pi}{8}$, что соответствует рассеянию носителей заряда на тепловых колебаниях решетки.

Здесь необходимо отметить, что такое приведение выражения (1.11) справедливо лишь при не очень больших концентрациях носителей заряда, когда вклад рассеяния носителей заряда на ионизированных примесях в подвижность меньше вклада электрон – фононного взаимодействия. При больших концентрациях константа A в постоянной Холла возрастает и достигает предельного значения $A \approx 1.97$.

В случае собственной проводимости $n_n = p_n = n_i$ из выражения (1.11) получаем

$$R_H = \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{1}{en_i} \left(\frac{\mu_p - \mu_n}{\mu_p + \mu_n} \right) = \frac{3\pi}{8\sigma_i} (\mu_p - \mu_n). \quad (1.13)$$

Как известно, электроны и дырки отклоняются магнитным полем в одну сторону. Очевидно, что если их подвижности равны, то в собственном полупроводнике эффект Холла наблюдаться не должен. Однако на самом деле подвижность электронов всегда превышает подвижность дырок, так

что в собственном полупроводнике разделение положительных и отрицательных зарядов происходит лишь за счет различия подвижности электронов и дырок. Таким образом, появление холловского поля в собственном полупроводнике обусловлено лишь различием подвижностей носителей заряда. Знак постоянной Холла в области собственной проводимости соответствует знаку тех носителей заряда, подвижность которых больше, т.е. у собственного полупроводника постоянная Холла отрицательная (т.к. $\mu_n > \mu_p$).

1.2. Магниторезистивный эффект или эффект Гаусса.

С действием силы Лоренца на подвижные носители заряда в полупроводнике связан и другой эффект – эффект изменения сопротивления полупроводника, по которому течет электрический ток при его внесении в магнитное поле. Этот эффект получил название эффекта Гаусса или магниторезистивного эффекта. Поскольку в этом случае происходит изменение сопротивления полупроводника току, текущему вдоль него, то этот гальваномагнитный эффект относится к категории продольных эффектов.

Рассмотрим сущность эффекта Гаусса на простой модели, предложенной Harding J.W. [3]. Если полупроводник, по которому протекает электрический ток, поместить в магнитное поле, то при одинаковых скоростях электронов влияние поперечного холловского поля, действующего на электроны с силой eE_y , компенсировалось бы магнитной составляющей силы Лоренца $e[\vec{v} \times \vec{B}]$. В результате этого все электроны двигались бы в полупроводнике по неизменным траекториям. Однако, фактически скорости электронов в кристалле различны, так что действия холловского поля компенсируются магнитной составляющей силы Лоренца лишь в среднем (так что полный ток в направлении оси y отсутствует). Если электрон движется со скоростью, равной средней скорости, то изменения его траектории действительно не происходит. Иначе обстоит дело с быстрыми электронами, скорость которых превышает среднюю, и с медленными электронами, скорость которых меньше средней скорости.

Поскольку электрическая составляющая силы Лоренца не зависит от скорости электрона, то ее действие на все электроны будет одинаково. Магнитная же составляющая силы Лоренца будет тем больше, чем больше скорость электрона. Это означает, что траектории движения быстрых электронов будут закручиваться магнитным полем гораздо сильнее, чем траектории медленных электронов. Что касается медленных электронов, то доминирующее влияние на них будет оказывать сила действия холловского поля. Поскольку она направлена в противоположную сторону, по сравнению с магнитной составляющей силы Лоренца, то она будет отклонять медленные электроны в сторону, противоположную отклонению быстрых электронов.

Поэтому сила действия холловского поля тоже будет закручивать медленные электроны, но в направлении, противоположном быстрым электронам. Чем больше сила действия холловского поля превышает силу действия магнитного поля, тем сильнее будут закручиваться траектории медленных электронов.

Допустим, что в полупроводнике присутствуют носители заряда обоих знаков (электроны и дырки), и что энергия носителей заряда пропорциональна квадрату их импульса (приближение сферических и изоэнергетических поверхностей), и что ток в направлении y равен нулю (скорость поверхностной рекомбинации на гранях образца, перпендикулярных оси y , равна нулю).

Рассуждения, проводимые в этом случае, так же как и в эффекте Холла, опираются на кинетическое уравнение для стационарного состояния [2]. Точно так же отыскивается векторная функция $\bar{\chi}$, описывающая отклонение функции распределения от её вида, соответствующего термодинамическому равновесию. Поэтому мы сразу воспользуемся соотношениями (1.3) и (1.4). Чтобы не загромождать расчёт аналогичными рассуждениями, рассмотрим электронную составляющую магнитосопротивления, (для дырочной составляющей запишем лишь конечный результат).

В отсутствие магнитного поля удельное сопротивление полупроводника может быть определено как

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{E}{j}. \quad (1.14)$$

В присутствии магнитного поля, когда направление \bar{E} не совпадает с направлением \bar{j} , эта формула будет включать в себя проекцию \bar{E} на \bar{j}

$$\rho_H = \frac{E_j}{j} = \frac{(\bar{E} \cdot \bar{j})}{\bar{j}^2} \quad (1.15)$$

Так как в линейном приближении по магнитному полю удельное сопротивление полупроводника не изменяется, для вычисления изменения сопротивления полупроводника в магнитном поле необходимо определить ток во втором приближении по магнитному полю, т.е. с точностью до B^2 .

Разлагая векторную функцию $\bar{\chi}_n$ (1.2) в ряд по степеням B до членов порядка B^2 , получим

$$\begin{aligned} \bar{\chi}_n &= -\frac{eh\tau_n}{2\pi m_n^*} \left\{ \bar{E} + \frac{e\tau_n}{m_n^*} [\bar{B} \times \bar{E}] + \left(\frac{e\tau_n}{m_n^*} \right)^2 ((\bar{B} \times \bar{E})\bar{B} - B^2\bar{E}) \right\} = \\ &= -\frac{eh\tau_n}{2\pi m_n^*} \left\{ \bar{E} + \frac{e\tau_n}{m_n^*} [\bar{B} \times \bar{E}] + \left(\frac{e\tau_n}{m_n^*} \right)^2 [\bar{B} \times [\bar{B} \times \bar{E}]] \right\} \end{aligned}$$

С учётом общего выражения для тока (1.6) и в приближении доминирующего электрон – фононного рассеяния получаем, что вектор плотности тока определяется как

$$\bar{j}_n = \sigma \left\{ \bar{E} + \frac{3\pi}{8} \mu_n [\bar{B} \times \bar{E}] + \frac{9\pi}{16} \mu_n^2 [\bar{B} \times [\bar{B} \times \bar{E}]] \right\} \quad (1.16)$$

Решая это векторное уравнение относительно E , находим, что

$$\bar{E} = \frac{1}{\sigma} \left\{ \left[1 + \frac{9\pi}{16} \mu_n^2 \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) B^2 \right] \bar{j}_n - \frac{3\pi}{8} \mu_n [\bar{B} \times \bar{j}_n] - \frac{9\pi}{16} \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \mu_n^2 (\bar{j}_n \times \bar{B})\bar{B} \right\} \quad (1.17)$$

Теперь нам известны векторы \bar{E} и \bar{j}_n . Подставляя выражения (1.16) и (1.17) в (1.15), получим, что относительное изменение сопротивления в магнитном поле в приближении слабых полей имеет вид

$$\frac{\rho_H - \rho}{\rho} = \frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{9\pi}{16} \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \mu_n^2 \left[B^2 - \frac{(\bar{j}_n \bar{B})^2}{j_n^2} \right]$$

Или

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{9\pi}{16} \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \cdot (\mu_n B)^2 \sin^2 \alpha \quad (1.18)$$

где α - угол между направлением магнитного поля и тока. Проводя аналогичные рассуждения для дырок, точно так же, основываясь на изотермическом приближении ($\nabla T = 0$), получим, что

$$\bar{\chi}_p = \frac{e\tau_p h}{2\pi m_p^*} \left\{ \bar{E} - \frac{e\tau_p}{m_p^*} [\bar{B} \times \bar{E}] + \left(\frac{e\tau_p}{m_p^*} \right)^2 [\bar{B} [\bar{B} \times \bar{E}]] \right\}$$

Откуда найдём дырочный ток. Складывая его с электронным током, получаем полный ток

$$\begin{aligned} \bar{j} = \bar{j}_n + \bar{j}_p = \sigma \left\{ \bar{E} + \frac{3\pi}{8} \cdot \left(\frac{n_n \mu_n^2 - p_n \mu_p^2}{n_n \mu_n + p_n \mu_p} \right) [\bar{B} \times \bar{E}] + \right. \\ \left. + \frac{9\pi}{16} \left(\frac{n_n \mu_n^3 + p_n \mu_p^3}{n_n \mu_n + p_n \mu_p} \right) \cdot [\bar{B} [\bar{B} \times \bar{E}]] \right\} \end{aligned} \quad (1.19)$$

Решая это векторное уравнение относительно \bar{E} так же, как это делалось прежде, и затем, пользуясь выражениями (1.15) и (1.16), определим

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{9\pi e}{16} \cdot \frac{B^2}{\sigma} \left[(n_n \mu_n^3 + p_n \mu_p^3) - \frac{\pi}{4} \frac{(n_n \mu_n^2 - p_n \mu_p^2)^2}{n_n \mu_n + p_n \mu_p} \right] \sin^2 \alpha \quad (1.20)$$

Это выражение получено для электронного полупроводника с учётом отличной от нуля концентрации дырок. Если $n_n \gg p_n$, то выражение (1.20) переходит в (1.18). Для дырочного полупроводника установленные зависимости (1.18) и (1.20) будут точно такими же, но вместо индексов n у концентраций необходимо брать индексы p , т.е. соответствующие концентрациям основных и неосновных носителей заряда.

Обычно на практике пользуются выражением (1.18), хотя выражение (1.20) более точно. Однако, поскольку обычные полупроводники, на которых наблюдается эффект Гаусса, являются примесными, то различие между (1.18) и (1.20) настолько мало, что им можно пренебречь. Пусть угол α между направлением тока и магнитного поля равен $\frac{\pi}{2}$, т.е. $\sin \alpha = 1$, тогда выражение (1.18) принимает вид

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{9\pi}{16} \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) (\mu_n B)^2. \quad (1.21)$$

Именно такая зависимость между $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ и B наблюдается для основных носителей заряда.

В таблице 1.1 приведены значения $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ при 20 градусах Цельсия в магнитном поле, индукция которого составляет 1 Тл, для различных полупроводников с электронной проводимостью.

Для тех же полупроводников, но с дырочной проводимостью $\frac{\Delta\rho}{\rho}$, будет меньше, поскольку подвижность дырок всегда меньше подвижности электронов. Для $InSb$ и $InAs$ приведённые численные значения $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ соответствуют монокристаллам.

Таблица 1.1

Материал	Si	Ge	GaSb	HgSe	HgTe	InAs	InSb
μ_n (м ² /В·с)	0,13	0,36	0,5	> 1	> 1	3	6,5
$\Delta\rho / \rho$	0,006	0,05	0,09	0,4	0,4	3,4	16

Известно, что подвижность носителей зарядов в плёнках этих же материалов в лучшем случае в 4 раза меньше, чем в монокристаллах. Поэтому

и $\Delta\rho / \rho$ для пленок этих материалов примерно в 16 раз меньше, чем для монокристаллов.

В.Н. Богомоловым [4] показано, что магниторезистивный эффект всё же может быть использован для регистрации слабых магнитных полей. Однако, для этого необходимо прибегнуть к применению дополнительного фиксированного смещающего поля большой величины. Такое техническое усложнение, обусловленное использованием строго постоянного и достаточно сильного магнитного поля, резко ограничивает область применения этих датчиков.

Кроме того, чувствительность датчиков магнитосопротивления может быть повышена путём использования датчиков специальной формы, например, диска Корбино, исключая паразитное влияние эффекта Холла.

Как показали Weiss H., Welker H. [5] изменение сопротивления в магнитном поле для образца в форме диска Корбино значительно больше, чем у образцов любой другой формы.

ГЛАВА 2. Некоторые вопросы разработки устройств на основе гальваномагнитных явлений.

Эксплуатационные свойства полупроводниковых устройств на основе гальваномагнитных явлений существенно зависят как от свойств и особенностей полупроводникового материала, так и от технологии изготовления их рабочих элементов. В этой главе приводятся параметры датчиков ЭДС Холла, являющихся основным элементом рассматриваемых устройств и технология их изготовления. Обсуждаются также вопросы оценки погрешности измерителей магнитных полей на основе датчиков ЭДС Холла и пути повышения их чувствительности.

2.1. Параметры устройств и обоснование выбора полупроводниковых материалов для их изготовления.

При практическом использовании датчиков ЭДС Холла встречаются задачи двух типов. В одном случае требуется получение максимальной, при данной мощности рассеяния, ЭДС Холла, причём входное сопротивление схемы может быть как угодно велико. В другом случае – целью является получение максимальной мощности в цепи Холла.

Для осуществления оптимальных по своим параметрам датчиков Холла, работающих по первому принципу, необходимо изготавливать их из материала, обладающего малой концентрацией носителей заряда одного знака, т.е. большим значением постоянной Холла R_H .

Во втором случае для согласования датчика с прибором материал должен удовлетворять двум условиям: сопротивление образца не должно быть слишком мало и подвижность носителей заряда должна быть достаточно высокой.

Остановимся на некоторых общих требованиях, предъявляемых к датчикам Холла и к материалам, из которых изготавливаются эти датчики.

Для изготовления датчиков Холла используются такие материалы, как Ge ; $InAs$; $InSb$; $GaAs$; $HgSe$; $HgTe$.

Датчик ЭДС Холла характеризуется следующими параметрами:

1. вольтовая чувствительность, численно равная ЭДС Холла U_H в магнитном поле с индукцией в 1 Тл

$$\gamma = \frac{U_x}{B};$$

2. уровень шума и пороговая чувствительность, т.е. минимальное значение магнитной индукции, которое может почувствовать датчик;

3. коэффициент использования $\eta = \frac{P_{вых}}{P_{вх}}$,

где $P_{вых}$ - мощность, снимаемая с датчика Холла,

$P_{вх}$ - мощность, подводимая к датчику Холла от внешнего источника;

4. коэффициент передачи $K = \frac{E_x}{E_y}$,

где E_y - напряжённость внешнего электрического поле, приложенного к датчику,

E_x - напряжённость поперечного поля Холла;

5. температурный коэффициент чувствительности;

6. рабочий интервал температур;

7. зависимость чувствительности датчика Холла от напряжённости магнитного поля;

8. размеры датчика;

9. входное и выходное сопротивления датчика;

10. максимальная мощность рассеяния;

11. максимальный рабочий ток;

12. коэффициент неэквипотенциальности.

Рассмотрим вопрос о пригодности полупроводниковых материалов для датчиков Холла с точки зрения вышеперечисленных параметров.

Естественно, эти параметры не охватывают все требования, которые предъявляются к датчикам при решении разнообразных задач. В то же время при решении данной конкретной задачи определяющими являются не все параметры датчика, а лишь часть их. Поэтому рассмотрение полупроводниковых материалов с точки зрения перечисленных параметров позволит в каждом конкретном случае выбрать тот материал, который больше всего подходит для решения данной задачи. При измерении магнитных полей основными параметрами датчиков Холла являются:

1. Вольтовая чувствительность или чувствительность датчика в режиме холостого хода равная

$$\gamma = \frac{U_H}{B} = \frac{RI}{d}, \quad (2.1)$$

где R - постоянная Холла;

I - сила тока через датчик;

d - толщина датчика.

Для сравнения чувствительности датчиков Холла из различных полупроводниковых материалов формулу (2.1) удобнее представить в виде:

$$\gamma = \frac{U_H}{B} = \sqrt{AR\mu P_m} \cdot b, \quad (2.2)$$

где A – безразмерный параметр, величина которого зависит от механизма рассеяния электронов в полупроводнике и может изменяться от 1 до 2 ,

μ - подвижность электронов в полупроводнике в $\frac{м^2}{В \cdot с}$,

$P_m = j^2 \rho$ - максимальная мощность, выделяемая в $1 м^3$ полупроводника,

j - плотность тока через датчик,

ρ - удельное сопротивление полупроводника, из которого изготовлен датчик Холла.

Величина P_m зависит от условий охлаждения датчика, геометрических размеров и максимально допустимого нагрева датчика. Если прене-

бречь площадью боковых граней датчика, то $P_m = \frac{2Q\Delta T}{d}$,

где Q - коэффициент теплоотдачи,

ΔT - максимально допустимый нагрев датчика (разность температур датчика и окружающей среды).

В условиях свободной конвекции в воздухе величину Q принимают равной $4 \frac{вт}{м^2 К}$. При хорошем тепловом контакте датчика с телом с большой теплопроводностью, Q можно увеличить в десятки раз.

Для датчиков Холла из различных полупроводниковых материалов, но с одинаковыми размерами, рассеиваемую мощность можно считать примерно одной и той же. С учётом P_m формула (2.2) применяется в виде

$$\gamma = \sqrt{\frac{2Q\Delta T A R \mu}{d}} \cdot b. \quad (2.3)$$

Таким образом, как видно из формулы (2.3), вольтовая чувствительность датчика Холла определяется в основном произведением ($\sqrt{R\mu}$), т.е. постоянной Холла и подвижностью носителей заряда.

В случае носителей заряда одного знака постоянная Холла равна

$$R = \frac{A}{en}. \quad (2.4)$$

Из формулы (2.4) видно, что для получения максимального значения R необходимо выбирать полупроводник с малой концентрацией носителей заряда, т.е. очень чистые кристаллы.

Таблица 2.1

Материал датчика	$n_i, \text{ м}^{-3}$	$\mu_{\text{max}}, \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$\rho, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$R_{\text{max}}, \text{ м}^3/\text{Кл}$	$\gamma, \text{ В/Тл}$	$V_{\text{шум}}, \text{ мкВ}$	$B_{\text{пор}}, \text{ Тл}$	$g, \text{ Ом}$
Si	$7 \cdot 10^{16}$	0,14	600	10^2	30	3,2	$2,5 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^6$
Ge	$2 \cdot 10^{19}$	0,36	0,5	10^{-1}	6,7	$9 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^3$
InAs	$2 \cdot 10^{21}$	3	10^{-3}	$3 \cdot 10^{-3}$	3,4	$44 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-9}$	10
InSb	$2 \cdot 10^{22}$	7	$4,5 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4}$	1,6	$99 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-10}$	0,45
HgTe	$5 \cdot 10^{24}$	1	$2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	0,1			
HgSe	$5 \cdot 10^{23}$	0,5	$6,7 \cdot 10^{-6}$	$12 \cdot 10^{-6}$	0,4			
Bi	$1 \cdot 10^{24}$	0,5	10^{-6}	$6 \cdot 10^{-6}$	0,06	$1 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-9}$	0,01

Что касается подвижности, то величина её определяется характером и особенностями химической связи атомов в полупроводнике, величиной

эффективной массы носителей заряда, а также наличием примесей и других дефектов решётки, и может изменяться в широких пределах.

В таблице 2.1 приведены минимальные значения концентрации носителей заряда и максимальное значение подвижности при 20°C, достигнутые для материалов, которые обычно применяются для изготовления датчиков Холла, а также значения удельного сопротивления и вольтовая чувствительность датчиков из этих материалов.

Вольтовая чувствительность вычислялась по формуле (2.2), при этом $A = 1, b = 0.005 м, P_m = 5 \cdot 10^7 \frac{Вт}{м^3} \left(Q = 200 \frac{Вт}{м^2 \cdot град}; d = 2 \cdot 10^{-4} м \right)$. У плёночных датчиков из *HgSe* толщина значительно меньше, $d = 10^{-5} м$. Из таблицы видно, что наибольшей вольтовой чувствительностью обладают датчики из кремния. Отсюда следует, что предельно возможная вольтовая чувствительность датчика Холла тем больше, чем больше ширина запрещённой зоны полупроводника и чем больше подвижность электронов (предполагается, что каждый материал очищен до значения концентрации примесей близкой к собственной концентрации носителей заряда). Однако, как будет показано ниже, материалы с очень большой шириной запрещённой зоной (1,5 эВ) и с малой подвижностью электронов нецелесообразно применять для датчиков Холла, поскольку при этом сильно возрастает внутреннее сопротивление датчика.

2. Уровень шума и пороговая чувствительность датчика.

Исследования, проведённые на датчиках Холла из *InAs* и *InSb*, показали, что шум в этих датчиках является тепловым, т.е. имеет такую же природу, что и в обычных проволочных сопротивлениях.

При этом [6] величина напряжения шума равна по формуле Найквиста

$$V_m = \sqrt{4kTr\Delta f}, \quad (2.5)$$

где k - постоянная Больцмана,
 T - абсолютная температура,
 r - сопротивление между выводами Холла,
 Δf - ширина полосы пропускания частот усилителя в герцах.

В датчиках из Ge, HgSe, HgTe шум имеет, вероятно, другую природу (1/f шум). Этот шум гораздо больше, чем тепловой шум, определяемый по формуле (2.5).

Тепловой шум присущ любому омическому сопротивлению, поэтому его можно рассматривать как минимально возможный шум датчика Холла, изготовленного из низкоомного полупроводника.

При оценке теоретического предела чувствительности датчиков Холла будем принимать во внимание только тепловой шум.

Зная величину шума, можно определить пороговую чувствительность $B_{пор}$ датчика, т.е. минимальную индукцию магнитного поля, под воздействием которой на холловских выводах возникает ЭДС, равная по величине напряжению шума.

$$B_{пор} = \frac{U_H}{\gamma} = \frac{\sqrt{kTr\Delta f}}{\sqrt{AR\mu P_m \cdot \epsilon}}.$$

Обозначим

$$\sqrt{\frac{kT\Delta f}{AP_m}} = D,$$

тогда

$$B_{пор} = \frac{D}{\epsilon} \sqrt{\frac{r}{R\mu}}. \quad (2.6)$$

Рассмотрим подробнее вопрос о сопротивлении между контактами датчика. Будем считать, что при прохождении тока между контактами эквипотенциальные линии представляют собой в первом приближении окружности с центрами в точках контактов (рис.2.1), при этом сопротивлением в области II пренебрегаем, поскольку основной вклад в общее сопротивление между контактами вносят окрестности контактов из-за малой площади поперечного сечения.

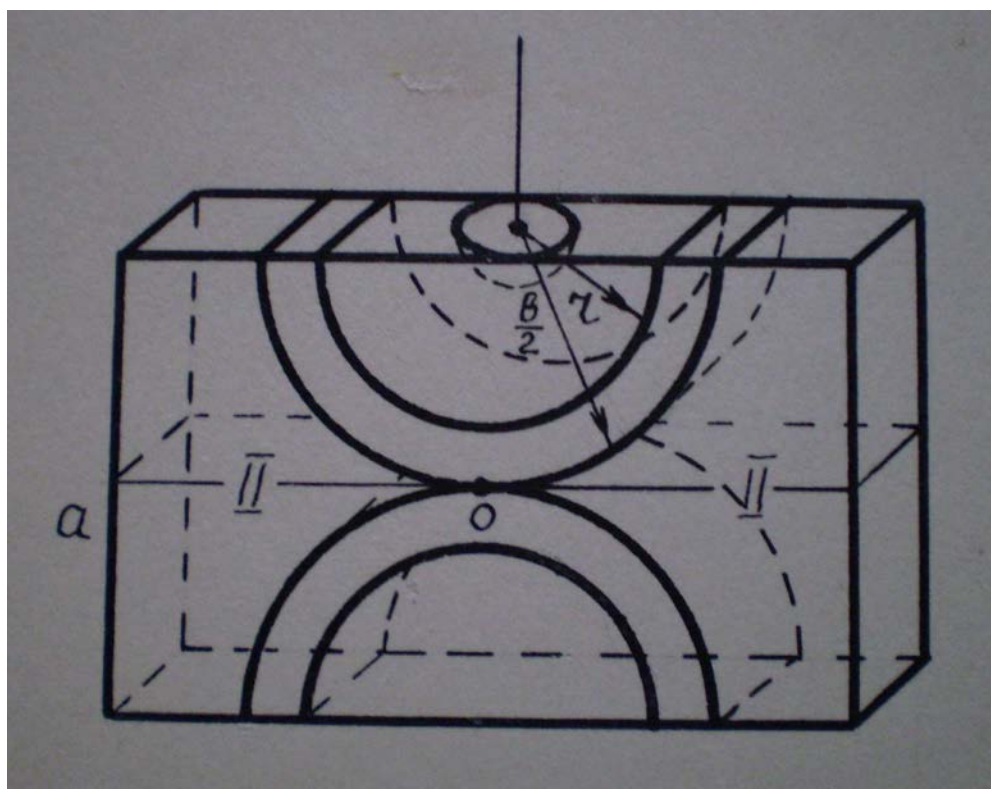


Рис. 2.1

На основании этих соображений получаем

$$R = 2 \int_{r_0}^{e/2} \frac{\rho d\tau}{\pi \tau d} = \frac{\rho}{\pi d} \left(\ln \frac{e}{2} - \ln r_0 \right) = \frac{2\rho}{\pi d} \ln \frac{e}{2r_0} \quad (2.7)$$

Где ρ - удельное сопротивление полупроводника,

d - толщина датчика,

e - ширина датчика,

r_0 - радиус контакта.

С учётом формулы (2.7) выражение для пороговой чувствительности можно записать в виде

$$B_{пор} = \frac{D}{eU} \sqrt{\frac{2}{\pi d} \ln \frac{e}{2r_0}} \quad (2.8)$$

В таблице 2.1 приводятся значения $V_{ш}$ и $B_{пор}$, вычисленные по формулам (2.5) и (2.8). Размеры датчика ($10 \times 5 \times 0,2 \text{ мм}^3$, $\Delta f = 100 \text{ Гц}$). Из таблицы видно, что из-за низкого уровня шума пороговая чувствительность датчиков из Bi в 15 раз, а датчика из $JnSb$ -- в 4,5 раза, лучше, чем у датчика из Si , несмотря на то, что вольтовая чувствительность кремниевого датчика в 2000 раз больше, чем датчика из висмута.

Если, кроме того, учесть то обстоятельство, что в Si шум может быть гораздо больше теплового, то станет ясно, что наилучшей пороговой чувствительностью обладают датчики из $JnSb$ и $JnAs$.

Однако, на практике усиление таких малых сигналов как 10^{-10} В (у датчиков из Bi) представляет большие трудности. Видимо по этой причине висмутовые датчики Холла не получили широкого распространения. В этом отношении вместо датчика из Bi , казалось бы, выгоднее использовать датчик из кремния ($V_{ш} = 3 \cdot 10^{-6}$ В). Однако, здесь мы впадаем в другую крайность: из-за очень большого сопротивления кремниевого датчика, порядка 10^6 Ом, трудно обеспечить помехоустойчивость усилителя.

С этой точки зрения наиболее пригодным является датчик из германия ($r = 5 \cdot 10^3 \text{ Ом}$).

Несколько сложнее усиливать пороговые сигналы на датчиках из $JnSb$ и $JnAs$.

Перспективным представляется датчик из чистого антимонида индия ($n = 10^{13} \text{ см}^{-3}$) $JnSb$, охлаждённый до 80-130 К, вольтовая чувствительность

которого составляет около $200 \frac{B}{Tл}$, пороговая чувствительность - около $5 \cdot 10^{-11}$ Тл и сопротивление - 120 Ом.

Все вышеизложенное рассматривалось для случая, когда с выводов Холла снимается переменный сигнал, т.е. когда датчик Холла работает на переменном токе.

В случае, когда с выводов Холла снимается постоянный сигнал, также имеет смысл понятие пороговой чувствительности. Измерение эффекта Холла на высокоомных материалах с $\rho > 10^3$ Ом·м при работе на постоянном токе, как известно, представляет большие трудности. Поэтому использовать высокую вольтовую чувствительность датчика, например из Si, при работе на постоянном токе весьма затруднительно. Необходимо заметить, что измерение таких сигналов возможно лишь в том случае, если нуль прибора поддерживается с такой же точностью.

3. Коэффициент использования η .

Важным параметром датчика Холла является коэффициент использования η , равный отношению мощности $P_{\text{вых}}$, выделяемой датчиком во внешней нагрузке, включённой в цепи между холловскими выводами, к мощности P_{ex} , подводимой к датчику

$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{ex}}} \quad (2.9)$$

Наибольшее значение коэффициент использования η имеет при согласованной нагрузке датчика, т.е. при равенстве сопротивления нагрузки r_n и сопротивления r_x между холловскими выводами. При этом условии выходная мощность датчика равна

$$P_{\text{вых}} = \left(\frac{E_x}{r_n + r_x} \right)^2 \cdot r_n = \frac{E_x^2 \cdot d \cdot l}{4\rho \cdot v}, \quad (2.10)$$

где ρ - удельное сопротивление полупроводника,

$\ell; d; \epsilon$ - геометрические размеры датчика.

Мощность P_{ex} , рассеиваемая на сопротивлении r_T датчика между токовыми выводами, определяется током I в датчике по формуле

$$P_{\text{ex}} = I^2 \cdot r_T = I^2 \cdot \frac{\rho \cdot \ell}{d \cdot \epsilon}. \quad (2.11)$$

Подставляя (2.9) и (2.11) в (2.8) и учитывая, что $\sigma = \frac{j}{E}$ для полупроводника с электронной проводимостью и $U_x = R_H \cdot \frac{I \cdot B}{d}$, для коэффициента использования можно получить следующее выражение

$$\eta = \frac{A^2 \mu^2 B^2}{4}, \quad (2.12)$$

т.е. коэффициент использования пропорционален квадрату подвижности электронов в полупроводнике. Отсюда видно явное преимущество полупроводников с высокой подвижностью электронов (*InAs*, *InSb*).

4. Коэффициент передачи K .

Коэффициент передачи представляется в виде

$$K = \frac{E_x}{E_y},$$

следовательно, он прямо пропорционален подвижности носителей заряда.

Таким образом, и в этом случае важно выбрать полупроводник с высокой подвижностью носителей заряда, т.е. *InAs* и *InSb*.

5. Температурная зависимость параметров датчиков. Рабочая область температур.

Изменение параметров датчика с изменением температуры происходит, главным образом, из-за наличия температурной зависимости концентрации и подвижности носителей заряда.

Кроме того, с температурой может изменяться и механизм рассеяния носителей заряда (параметр A) и сопротивление контактов.

В режиме холостого хода изменение чувствительности датчика с температурой за счёт изменения подвижности можно скомпенсировать, поддерживая постоянным ток через датчик.

В этом случае

$$\gamma = \frac{RI}{d}.$$

Тогда изменение чувствительности с температурой будет определяться только температурной зависимостью постоянной Холла R .

Данные в таблице 2.2 относятся к области собственной проводимости, где постоянная Холла равна

$$R = \frac{A}{n_i} \cdot \frac{h-1}{h+1}$$

Где $h = \frac{\mu_n}{\mu_p}$ - отношение подвижности электронов к подвижности

дырок в полупроводнике,

n_i - концентрация носителей заряда в области собственной проводимости.

Таблица 2.2

Материал датчика	E_0 (эВ)	n_i (Т)	$dn_i/n_i dT$ на 1°C
Si	1,21	$3,9 \cdot 10^{22} \text{T}^{3/2} e^{-7020/\text{T}}$	8,3%
Ge	0,786	$9,7 \cdot 10^{22} \text{T}^{3/2} e^{-4350/\text{T}}$	5,5 %
InAs	0,47	$2,7 \cdot 10^{21} \text{T}^{3/2} e^{-2720/\text{T}}$	3,3 %
InSb	0,26	$6 \cdot 10^{20} \text{T}^{3/2} e^{-1510/\text{T}}$	2,2 %

Допустим, что A и h не зависят от температуры. Тогда температурная зависимость R будет целиком определяться изменением n_i с температурой. Для невырожденного полупроводника

$$n_i = CT^{3/2} e^{-\frac{E}{2kT}}$$

В таблице 2.2 приведены значения $n_0; n_i(T)$ и температурного коэффициента n_i для $Si; Ge; InAs; InSb$ при комнатной температуре.

Как видно из таблицы 2.2 при переходе от Si к $InSb$ температурный коэффициент, хотя и уменьшается в 4 раза, всё же остаётся высоким (2,2% на $1^\circ C$).

Для точных измерений при этом необходимо поддерживать постоянную температуру датчика с точностью $\pm (0,1 \div 0,01)C^0$, что во многих практических случаях связано с большими трудностями, а иногда и невозможно.

При наличии такого высокого температурного коэффициента постоянной Холла R , по-видимому, выгоднее другой вариант включения датчика - поддерживать постоянным не ток через датчик, а приложенное напряжение.

Тогда, выражение для вольтовой чувствительности можно представить в виде

$$\gamma = \frac{ARJ}{d} = \frac{Ane\mu E_y d\epsilon}{ned} = A\mu E_y \epsilon$$

где E_y - напряжённость приложенного электрического поля в датчике.

Если E_y поддерживать постоянной, то температурная зависимость чувствительности будет определяться температурным коэффициентом подвижности, который при $20^\circ C$ не превышает 0,5–1% на $1^\circ C$. Иногда удаётся скомпенсировать и эту зависимость. При работе датчика на внешнюю

нагрузку наряду с температурной зависимостью R и μ следует учитывать также температурную зависимость сопротивления датчика, т.к. изменение внутреннего сопротивления датчика ведёт к рассогласованию входа усилителя.

Из вышеизложенного ясно, что применять для изготовления датчиков Холла полупроводники с собственной проводимостью целесообразно лишь в том случае, если требуется высокая чувствительность, а температурная зависимость параметров играет второстепенную роль. Для точности измерений необходимо либо точно компенсировать зависимость параметров от температуры, либо использовать для изготовления датчиков легированные полупроводники с параметрами, не зависящими от температуры. В одной из своих работ В.В.Галаванов [7] приводит теоретическое обоснование выбора минимальной концентрации примеси N_{\min} в легированных полупроводниках. В качестве примера в работе вычисляется N_{\min} для разных полупроводниковых материалов. Минимальное значение N_{\min} должно быть выбрано так, чтобы температурный коэффициент чувствительности датчика не превышал заданную величину.

Значение N_{\min} , отвечающее этому требованию, можно определить по известным величинам $h = \frac{\mu_n}{\mu_p} n_i$ и n_i , если предположить, что в интересующей нас области температур A и N не зависят от температуры. Данные вычислений приведены в таблице 2.3, единицы измерений такие же, как и в таблице 2.1 .

Таблица 2.3

Материал	h	$n_i(T)$	n_i	N_{\min}	R_x	μ ,	ρ	γ

Материал	h	$n_i(T)$	n_i	N_{min}	R_x	$\mu,$	ρ	γ
Ge	2	$97 \cdot 10^{21} \cdot T^{3/2} \times e^{-4350/T}$	$1,25 \cdot 10^{20}$	$1,3 \cdot 10^{21}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$	0,36	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$75 \cdot 10^{-6}$
InAs	8 0	$2,7 \cdot 10^{21} \cdot T^{3/2} \times e^{-2720/T}$	$4,6 \cdot 10^{21}$	$3,2 \cdot 10^{22}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	2,5	$8 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$
InSb	4 0	$6 \cdot 10^{20} \cdot T^{3/2} \times e^{-1510/T}$	$4 \cdot 10^{22}$	$2,8 \cdot 10^{23}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	4,6	$3 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-6}$

6. Зависимость чувствительности датчика Холла от индукции магнитного поля.

Зависимость постоянной Холла R , а, следовательно, и вольтовой чувствительности γ от индукции магнитного поля B по теории должна наблюдаться при $\mu B > 0,15$, т.е. при $B > 0,02$ Тл в *InSb* и $B > 0,5$ Тл в *Ge*. Исходя из этой оценки, считалось, что в *InSb* при обычных полях 0.05 - 1 Тл постоянная Холла R должна зависеть от B . Однако, в эксперименте зависимость R от B не обнаруживается. Объяснение этого факта сводится к следующему.

Из теории гальваномагнитных эффектов в изотропном полупроводнике известно, что в сильных полях ($\mu B \gg 1$) параметр A в формуле $R = \frac{A}{ne}$ равен единице ($A = 1$). В слабом поле величина A в зависимости от механизма рассеяния электронов изменяется от 1 до 2; при рассеянии электронов на тепловых акустических колебаниях решётки $A = 1.18$; при рассеянии электронов на оптических колебаниях $A = 1.1$ или $A = 1$; при рассеянии электро-

нов на ионах примеси $A = 1.93$. Исследования показывают, что при комнатной температуре в $InSb$, а также в $InAs$ в пределах точности эксперимента R не зависит от B . Это указывает на то, что в данных полупроводниках $A = 1$.

В этом отношении $InSb$ и $InAs$ имеют явное преимущество перед Ge , где $A = 1.18$ и наблюдается зависимость R от B . Кроме того, для Si и Ge следует учитывать влияние анизотропии на эту зависимость. При работе датчика на внешнюю нагрузку следует учитывать также изменение внутреннего сопротивления датчика Холла в магнитном поле. В слабых магнитных полях магнитосопротивление равно

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \beta\mu^2 B^2,$$

где β - параметр, величина которого определяется характером рассеяния электронов.

Теоретические исследования показывают, что в $InSb$ $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ близок к нулю, т.е. несмотря на высокую подвижность электронов $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ в $InSb$ очень мало. Установлено Weiss Н. [5], что обычно наблюдаемое в эксперименте большое $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ в $InSb$ связано с наличием неоднородностей в полупроводнике. Отсюда можно заключить, что для изготовления датчиков Холла следует использовать однородные полупроводники.

7. Геометрические размеры датчика.

Величина ЭДС Холла зависит и от геометрических размеров датчика, а именно, от соотношения длины и ширины, а также от толщины датчика. Формула (2.1) выведена для случая бесконечно длинного образца, когда

$$\frac{\ell}{b} \gg 1.$$

Обычно образцы для датчиков Холла имеют прямоугольную форму в виде тонких пластин или плёнок. В таких случаях влияние относительных размеров датчика на величину ЭДС Холла становится заметным и им нельзя пренебрегать. Если $\frac{\ell}{b} = 1$, то нельзя получить полной ЭДС Холла, т.к. происходит сильное закорачивание.

Поэтому формула (2.1) принимает вид

$$U_x = R_H \frac{I \cdot B}{d} f\left(\frac{\ell}{b}\right).$$

Если построить график зависимости отношения $\frac{U_H}{U_0}$ (U_H - ЭДС Холла на датчике данной формы, U_0 - ЭДС Холла на бесконечно длинном датчике) от величины отношения $\frac{\ell}{b}$, то из вычислений J. Isenberg [8] и R.F. Wick [9] ход поправочной функции будет иметь вид (рис.2.2).

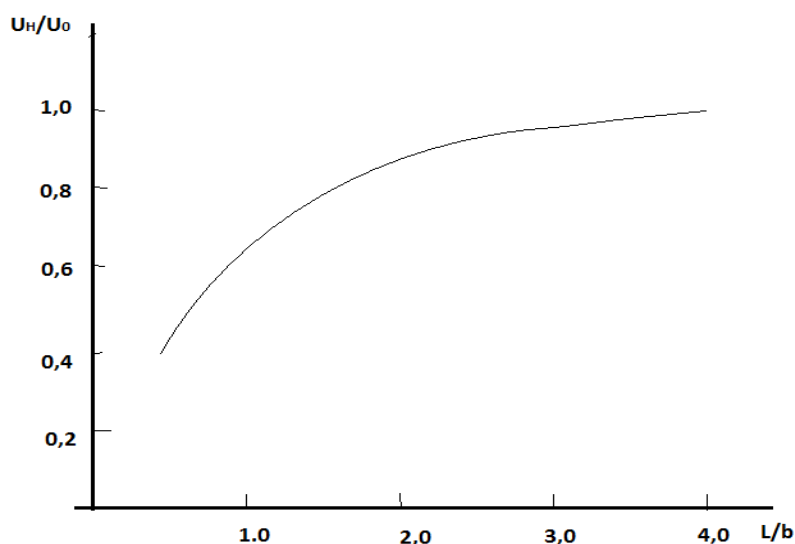


Рис . 2.2

Поправка на конечную длину датчика относительно мала. При $\frac{\ell}{b} = 2$ величина $\frac{U_H}{U_0}$ достигает значения 0,95; а при $\frac{\ell}{b} = 3$ поправка составляет все-

го около 1%. Поэтому не имеет смысла увеличивать это отношение, на практике обычно берётся $\frac{\ell}{\delta} = 2 \div 3$. К такому же выводу пришёл F.Kuhrt [10].

Н.И.Липпман и F. Kuhrt [11] вычислили ход поправочной функции $f\left(\frac{\ell}{\delta}\right)$ при разных углах Холла (θ) (рис.2.3)

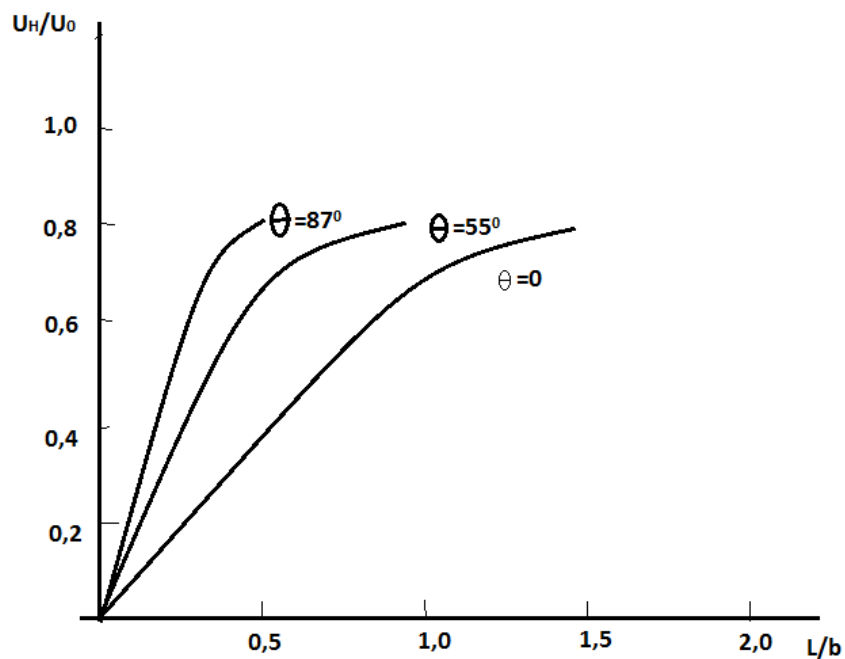


Рис.2.3

Мы рассмотрели здесь влияние соотношения сторон датчика, т.е. длины и ширины его на чувствительность.

Как следует из формулы (2.3) ЭДС Холла обратно пропорциональна корню квадратному из толщины датчика.

Следовательно, более тонкий датчик из полупроводника с оптимальными характеристиками может обладать большей чувствительностью, чем датчик из полупроводника с большой подвижностью электронов и с большим коэффициентом Холла. Изготовление датчика наименьшей толщины зависит от технологических возможностей полупроводника, при которых он

не теряет или заметно не ухудшает основных своих характеристик – концентрации и подвижности электронов. Поэтому минимально возможную толщину датчика можно рассматривать как один из показателей полупроводника, из которого он изготавливается. Наиболее тонкие датчики в виде плёнок можно получить испарением в вакууме селенида и теллурида ртути ($HgSe$ и $HgTe$). Их характеристики мало отличаются от характеристик кристаллов этих веществ.

Можно также получать плёночные датчики Холла из антимонида и арсенида индия $InSb$ и $InAs$.

Создание плёночных датчиков из названных низкоомных полупроводниковых материалов представляется особенно интересным, поскольку с уменьшением толщины датчика будет расти его сопротивление и, следовательно, шум. Это облегчит измерение пороговой чувствительности датчика.

Как видно из формулы (2.8) величина пороговой чувствительности обратно пропорциональна подвижности электронов и ширине датчика. Поэтому для измерения очень слабых полей нужно использовать полупроводниковые материалы с высокой подвижностью электронов, а ширину датчика выбирать как можно больше. При этом необходимо сохранять отношение $\frac{\ell}{b} \geq 2 \div 3$, хотя при заданной длине датчика вероятно выгоднее выбирать форму датчика, близкой к квадратной.

Такие параметры датчика как максимальная мощность рассеяния, входное и выходное сопротивления датчика мы фактически уже рассмотрели, поэтому ещё раз не будем на них останавливаться.

8. Коэффициент неэквипотенциальности.

При изготовлении датчиков Холла обычно не удаётся расположить электроды Холла точно на эквипотенциальной линии, поэтому при прохождении тока через датчик на электродах Холла и без включения магнитного

поля имеется некоторая разность потенциалов, а в цепи Холла при конечной величине нагрузки появляется ток.

Для исключения асимметрии, связанной с неэквипотенциальным расположением электродов Холла, служит третий электрод (рис.2.4).

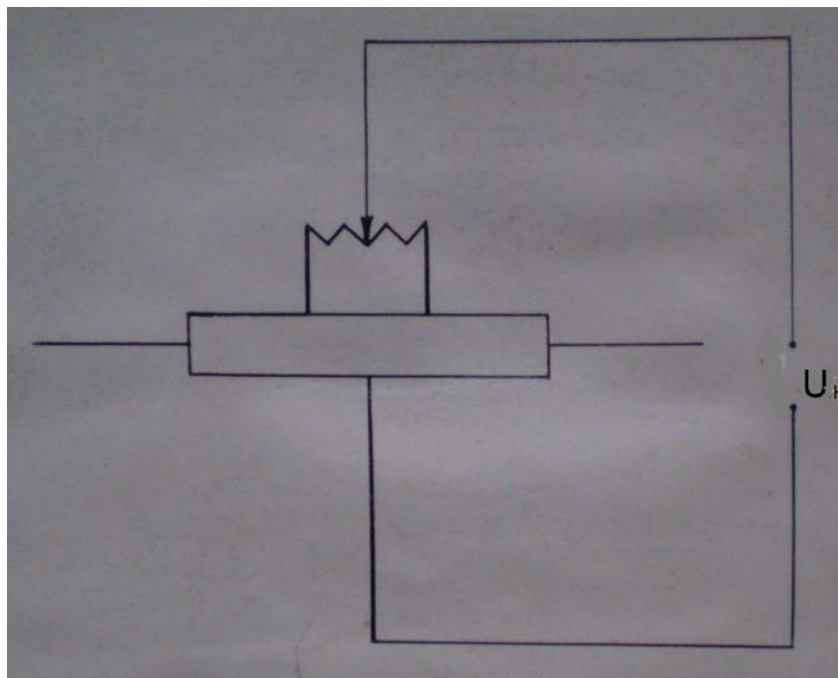


Рис.2.4

Однако компенсацию неэквипотенциальности можно осуществить и без третьего электрода. Датчик с одним впаянным электродом Холла включается в измерительную схему, второй электрод остаётся подвижным. Перемещая его по боковой грани датчика, можно добиться установления нуля гальванометра в компенсационной схеме. При нулевом положении стрелки (зайчика) гальванометра припаивается второй электрод. Таким образом, технологически удаётся избежать неэквипотенциальности. Искажения показаний датчика при работе в переменном магнитном поле может быть вызвано наведением ЭДС индукции в контуре, образованном датчиком, зондами и подводными проводами. Величину этого паразитного сигнала можно свести к минимуму (рис. 2.5), если один из электродов Холла провести через датчик точно по его середине и подвести к измерительному прибору так, чтобы по возможности уменьшить площадь контура в цепи электродов Холла, пронизываемую магнитным потоком.

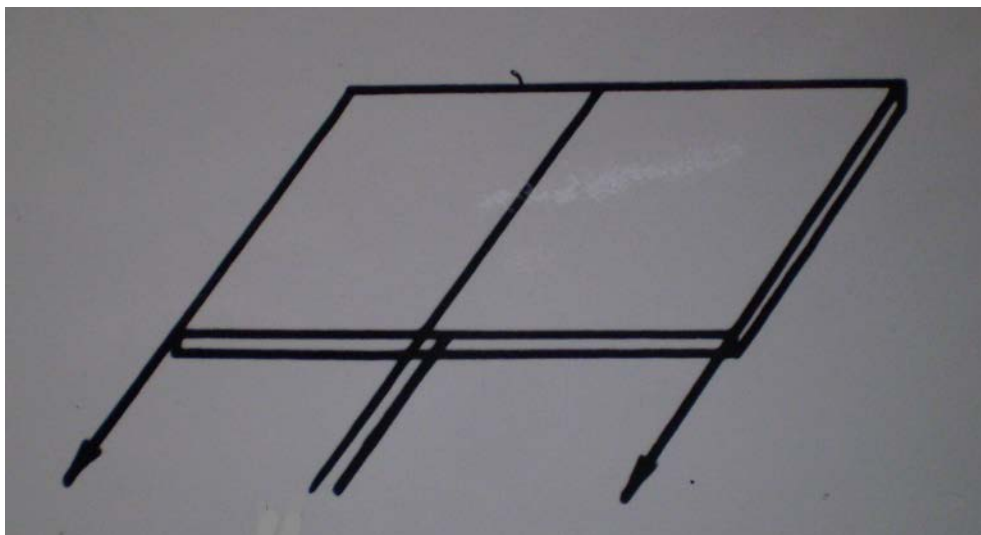


Рис. 2.5

Из рассмотрения, проведённого выше, следует, что в каждом конкретном случае необходимо выбирать тот полупроводниковый материал, который больше всего подходит для решения конкретной задачи. При выборе полупроводникового материала для датчиков Холла помимо выше приведённых параметров необходимо учитывать также другие его свойства и особенности, такие как простота получения, технологичность и возможность создания хороших невыпрямляющих контактов к датчикам.

Создание омических контактов на высокоомных материалах представляет собой довольно сложную задачу.

2.3. Технология изготовления кристаллических датчиков Холла.

2.3.1. Обработка пластины.

Применяемые обычно для изготовления датчиков Холла полупроводниковые материалы (Ge, GaAs, InAs, InSb) получают в промышленности в виде крупных кристаллов. Кристаллы нарезаются на тонкие пластинки, перпендикулярные направлению их роста. В случае германия для резки применяются алмазные дисковые пилы, представляющие собой латунный диск, в края которого впрессована алмазная крошка. В случае антимолида и

арсенида индия используется электроискровой станок, который в случае интерметаллических соединений является предпочтительнее дисковых пил. Способ резки выбирается так, чтобы не изменялись параметры полупроводниковых материалов за счёт очень сильного перегрева кристаллов.

Пластинка, разрезанная тем или иным способом, обычно получается толщиной не меньше чем $0,2 \div 0,3$ мм.

Окончательная обработка и доводка пластин до нужных размеров производится шлифованием на шлифовальных порошках разных номеров. Любая грубая обработка поверхности, такая как резка, шлифовка и механическая полировка, повреждает поверхностный слой образца. В одной из работ, например, Т.М.Виск [12], приводится детальный обзор поверхностных повреждений. Показано, что для процессов шлифования глубина повреждения зависит от следующих факторов, связанных с абразивом и шлифуемым материалом: размера, формы, твёрдости и свободы перемещения абразивных частиц, ориентации поверхности и механических свойств материала.

Для каждого из этих факторов имеется свой характеристический минимум повреждённого слоя. Повреждённый слой состоит из тонкого, очень фрагментированного слоя на поверхности и более глубокого слоя пластически деформированного материала, который присутствует из-за местного разогрева. Если процессы шлифовки выполняются неосторожно, то местный разогрев может быть излишне большим, в результате наклёпанный слой получается толще, чем характеристический минимум. В работе авторов Н.С.Гатос, М.С. Лавин, Е.Р.Варкои [13] была измерена глубина повреждённого слоя на некоторых соединениях. Авторы нашли, что глубина повреждения с увеличением твёрдости линейно уменьшается. Разница в глубине повреждения на поверхностях (111) и $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ приписывается искажённой тетраэдрической структуре на поверхностях (111) .

Для устранения поверхностных дефектов производится завершающая операция- травление. В случае датчиков Холла и датчиков Гаусса при травлении стояли следующие задачи:

1. удаление поврежденного слоя после шлифовки и получение образца заданной толщины;
2. получение чистой поверхности.

При устранении поверхностных дефектов должно соблюдаться единственное условие: материал должен удаляться равномерно по всей поверхности, не повреждая её.

Известно шесть основных процессов травления.

1. Химический. Полупроводниковый материал принимает участие в химической реакции. Сюда относятся, очевидно, только те реакции, которые не образуют продуктов на поверхности. В большинстве случаев химические травители представляют собой водные растворы, но к этой категории относятся и неводные растворы, расплавленные соли, газы.

2. Электролитический. В этом случае необходим электрический ток для растворения материала в электролите.

3. Катодная бомбардировка. Материал является катодом в тлеющем разряде. Атомы на поверхности материала выбиваются бомбардировкой ионами.

4. Тепловой. Полупроводниковый материал нагревается до высокой температуры в вакууме или в атмосфере инертного газа. Травление совершается путём испарения. Использование теплового травления является спорным.

5. Травление расплавленными металлами. В качестве травителей используются расплавленные металлы, т.к. они растворяют определённые материалы.

6. Растворение. Травитель представляет собой жидкость, которая является растворителем для материала, подвергающегося травлению. Травление в расплавленном металле может рассматриваться как частный случай растворения.

Эти шесть основных процессов, за исключением последнего, могут использоваться для травления некоторых полупроводниковых соединений типа $A_3 B_5$.

Мы в работе применяли химический процесс травления. Для химического травления можно использовать несколько различных видов реактивов, но при одном единственном условии: нерастворимые продукты должны отсутствовать. Травитель может быть раствором, расплавленной солью или газом. Последними двумя травителями обычно пользуются при травлении $AlSb$ и VP .

Для разрушения ковалентной связи соединений $A_3 B_5$ необходимо присутствие окисляющего агента, однако, некоторые соединения из-за наличия ионной составляющей связи можно травить и соляной кислотой (при этом следует быть осторожными, т.к. соляная кислота с элементом пятой группы таблицы Менделеева при вдыхании образует опасный ангидрид). В качестве окисляющих агентов могут быть использованы металло-металлоидные соединения и анионы. Известны такие окисляющие агенты как: H_2O_2 , HNO_3 , Fe^{3+} , MnO_4^- , $Cr_2O_7^{2-}$, Cl^{4+} , $V(OH)_4^+$. Но только первые два нашли широкое применение. В большинстве случаев к окисляющему агенту должен быть добавлен комплексный агент для образования стабильных ионов в травителе. Для того, чтобы составить новый травитель, нужно принимать во внимание химические свойства отдельных элементов. Имея в виду, что в большинстве случаев обязательно нужен окисляющий агент, желательно контролировать все возможные реакции между ионами и комплексами, присутствующими в растворе. Например, $HNO_3: HF$ - реактив для $InSb$, однако, при продолжительном травлении в одном и том же растворе на об-

разце откладывается InF_2 . Этого не наблюдается в смеси азотной и винной кислот. При травлении желательнее употреблять самые чистые растворы, хотя нет специальных работ, посвящённых влиянию чистоты составных частей травителя на скорость травления и способ разрушения. В одной из работ Gatos сообщал, что двойные дистилляты кислот, применяемые при травлении арсенида галлия, уменьшают склонность к термической конверсии этого материала. Это происходит из-за удаления меди, присутствовавшей до этого в этих кислотах.

Факторами, влияющими на способ и скорость травления, являются состав, температура данного травителя и в некоторых случаях тип проводимости и чистота полупроводникового материала. Любое существенное изменение в составе травителя в конце концов скажется на изменении скорости травления, а при больших изменениях состава травитель перестанет растворять или образует плёнку на поверхности образца. Некоторые авторы, такие как W. Bardsley и R.L. Bell [14], сообщали, что скорость травления антимонида индия в травителе CP-4 (HNO_3 : HF : CH_3COOH) уменьшается с увеличением количества уксусной кислоты и поверхность образца становится неполированной. Увеличение температуры травителя увеличивает скорость травления, если стабильность комплексов при этом не уменьшается.

Поскольку для изготовления датчиков Холла применяются разные полупроводники и травители для них разные, то рассмотрим травление каждого из них отдельно.

1. Антимонид индия.

При травлении InSb обязательно присутствие окисляющего агента. Основной частью всех травителей является окислитель. Из многочисленных окисляющих агентов мы использовали HNO_3 и H_2O_2 .

Трёхвалентная сурьма, которая может находиться в сильноокислых растворах, легко гидролизует с образованием ионов антимонида, которые

после разбавления могут выпасть в осадок в виде соли. При реакции с сильноокисляющими агентами антимоиды образуют нерастворимые окислы.

Чтобы перевести сурьму в раствор, необходимо иметь комплексные агенты, которыми могут быть фтористая, соляная, винная, молочная, лимонная и щавелевая кислоты.

Большинство из этих комплексных агентов или образуют комплексы с индием или с ним не реагирует. Модификаторы и ингибиторы добавляются для изменения скорости и способа разрушения. Хотя при травлении установлены определённые соотношения компонентов, их можно с успехом изменять в определённых пределах.

Регулируя время травления и температуру, можно компенсировать разницу в скорости травления. Для антимоида индия нами использовался травитель СР-4 (адская смесь) в следующем составе:

- HNO_3 – азотная кислота – 25 мл
- HF – плавиковая кислота – 15 мл
- CH_3COOH – уксусная кислота - 15 мл
- Br_2 - бром - 0,3 мл

Этот травитель найден чисто практически. Он даёт чистую поверхность. Скорость травления относительно невелика.

1. Арсенид индия и арсенид галлия.

Если арсенид индия подвергается действию травителя с соляной кислотой, то получают чётко очерченные ямки, в то время как на арсениде галлия этого не наблюдается. Арсениды реагируют и образуют комплексы с большинством реактивов, применяемых для антимоидов. Сильнодействующие окислительные реактивы образуют с арсенидами растворимые мышьяковистые кислоты. Нерастворимых окислов, как в случае антимоидов, не образуется.

Таким образом, водные растворы сильно действующих кислот могут использоваться как травители. Серная кислота действует не только как комплексный агент, но и увеличивает вязкость травителя, что важно при химической полировке.

Для травления арсенида индия использовалась горячая смесь 10 H_2O_2 : 1 HNO_3 . Арсенид галлия в горячей смеси 5 NaOH : 1 H_2O_2 : 2 H_2O . После того как образцы протравлены в соответствующих травителях, производится завершающая операция – припайка выводов Холла

2.3.2. Изготовление омических контактов в полупроводниковых приборах из антимонида индия (InSb)

Для изготовления различных приборов используются интерметаллические полупроводниковые соединения типа A_3B_5 . К ним относятся в первую очередь антимонид индия (InSb) и арсенид индия (InAs). Из этих материалов разрабатываются и исследуются такие приборы как измерители магнитных полей (датчики Холла), индикаторы проходящей мощности СВЧ - диапазона, туннельные диоды и т. д.

Одной из основных проблем при создании и использовании названных приборов является проблема осуществления хорошего омического контакта типа металл - полупроводник. В настоящей работе рассматривается использование лазерной технологии при создании омического контакта типа металл - полупроводник на туннельном диоде (ТД) из антимонида индия (InSb), и проводится проверка его качества.

Омический контакт, как правило, определяют как контакт, на котором не имеют место выпрямление и другие нелинейные эффекты. Однако, это определение является упрощенным и не охватывает некоторые практические моменты, важные для работы приборов, в частности, понятие о сопротивлении контакта. Более целесообразно рассматривать омический контакт, как элемент, обеспечивающий прохождение электрического тока в по-

лупроводник (или в обратном направлении), но не участвующий в активных процессах, которые происходят в р-n-переходе.

Физические и механические свойства омических контактов должны удовлетворять ряду требований. Одно из них - малое электрическое сопротивление, которое является существенным при р — n — переходах. Это связано с тем, что в диодах сопротивление омического контакта снижает отношение обратного сопротивления к прямому сопротивлению и, следовательно, снижает коэффициент полезного действия. Другое требование сводится к минимальной генерации на контакте неосновных носителей заряда при прохождении тока. Если допустить такую генерацию, то последующая диффузия неосновных носителей заряда в полупроводник приводит к повышению обратного тока.

Получение контактов малого сопротивления требует особого внимания. Если омические свойства в объеме полупроводника и металла сохраняются вплоть до границы раздела между ними, и вблизи этой границы не возникают потенциальные барьеры, то сопротивление контакта не может быть выше суммы последовательных сопротивлений металла и полупроводника, образующих контакт.

Мотт и Шотки в своей теории запирающего слоя определили условия для устранения выпрямления на контакте металл – полупроводник. Для этого необходимо выбрать металлический электрод с работой выхода меньшей, чем у полупроводника, если он имеет электронную проводимость. А если он имеет дырочную проводимость, то работа выхода у металла должна быть больше, чем у полупроводника.

Омические контакты можно изготовить пайкой, сплавлением, сваркой, напылением, электрохимическим и химическим нанесением покрытий и другими операциями.

Названными методами было получено некоторое число туннельных диодов с омическими контактами, по результатам их исследований можно дать характеристику методов.

Контакты, полученные пайкой, во многих случаях были удовлетворительны. Метод прост и надежен. Основная трудность - индий плохо припаяется к кристаллам антимонида индия и арсенида индия при незначительном отклонении от технологии.

Метод пайки с предварительным электролитическим осаждением меди также относительно несложен. После нанесения меди контакты легче припаяются, но они недостаточно надежны. При нанесении меди на полупроводник поверхность кристалла загрязняется, после осаждения требуется его дополнительная механическая обработка.

С точки зрения получения хороших контактов интересен метод вплавления в вакууме. Контакты получаются прочные, легко паяются, их площадь можно сделать достаточно малой. Процесс требует специального оборудования, большие требования предъявляются к характеристикам печи и методике нанесения индиевых пластинок.

Метод сварки позволяет создавать прочные точечные контакты на несложной установке. При подобранном режиме контакты привариваются быстро и надежно. Однако необходимо тщательно подбирать режим, так как возможно нарушение поверхности кристалла. Контакты не всегда омические.

Метод втирания трудоемок и дорог, но не требует специального оборудования.

Наиболее перспективным представляется метод изготовления омического контакта с помощью лазера.

Отметим, что современные технологии получения полупроводниковых приборов из антимонида индия (JnSb) и арсенида индия (JnAs) и особенно омических контактов к ним приводит значительному разбросу параметров контактов, и, как следствие, к малому выходу годных изделий.

Авторами предложен способ получения омических контактов к антимониду индия (JnSb) с помощью лазера [15], сущность которого заключается в следующем. Полученные по обычному технологическому циклу

(предварительная обработка: резка, шлифовка, полировка, травление, обезжиривание) полупроводниковые заготовки из антимонида индия (JnSb), подвергаются дополнительной обработке импульсом лазера Квант -12 с энергией, необходимой для диссипации окислов в месте наложения контактного материала. Сразу же за этим на обработанную импульсом лазера поверхность антимонида индия (JnSb) помещается контактный материал в виде фольги, который вплавляется импульсом лазера Квант - 12 с более высокой энергией. Указанные операции осуществляются на воздухе.

Наличие на поверхности антимонида индия (JnSb) окисной пленки и адсорбированных газов, а также возможные повреждения поверхности при термическом воздействии являются основными препятствиями для получения качественных омических контактов на антимониде индия (JnSb). В предлагаемом методе импульсы лазера обеспечивают диссипацию окислов, десорбцию газов и расплавление помещенного на поверхности антимонида индия (JnSb) материала контакта.

Энергия импульса дополнительной обработки материала выбирается из условия нагрева антимонида индия (JnSb) в месте будущего контакта выше температуры диссоциации окислов. Толщина фольги контактного материала должна быть такой, чтобы обеспечить заданный объем контакта. Интенсивность основного импульса определяется из условия плавления материала контакта и получения на поверхности полупроводника материала определенной температуры.

Использование двух импульсов лазерного излучения различной интенсивности, сдвинутых во времени на интервал времени, необходимый для наложения фольги на подготовленное место контакта, позволяет значительно уменьшить промежуток времени между операциями. Дополнительной обработки поверхности полупроводника при этом не требуется. Вплавление контакта производится без привлечения для выполнения этих операций сложного и дорогого технологического оборудования.

Предлагаемый процесс изготовления омических контактов состоит из следующих операций:

1. подготовленная заготовка антимонида индия необходимого размера помещается на предметный столик лазерной установки Квант- 12 и совмещается с точкой падения луча лазера;

2. на выбранное место поверхности заготовки подается одиночный импульс лазерного излучения с энергией, необходимой для диссипации окислов.

3. на обработанное место поверхности заготовки накладывается фольга контактного материала (индия) толщиной $200 \div 300$ мкм;

4. наложенная фольга контактного материала облучается импульсом лазерного излучения с энергией, необходимой для сплавления индия в JnSb.

Экспериментальные исследования показали хорошие омические свойства контакта (малая величина переходного электрического сопротивления, линейность, симметричность вольтамперной характеристики), высокую механическую прочность, высокую воспроизводимость результатов.

Предложенный метод обладает целым рядом преимуществ. Дополнительная обработка лазерным излучением с энергией в импульсе, необходимой для диссипации окислов, и малая длительность следования импульсов диссипации и сплавления, обуславливают повышение качества контактов. Кроме того, степень качества повышается, так как площадь контакта может быть выбрана в требуемых пределах. Местоположение контакта может быть выбрано с точностью, обусловленной фиксированием нахождения пятна луча лазера. Форма сечений площадей потенциальных контактов может быть выбрана с большей степенью подобия. Устраняются операции гальванического или вакуумного нанесения меди или индия.

Описанные операции легко могут быть автоматизированы, что позволит автоматизировать процесс изготовления омического контакта типа металл – полупроводник на туннельном диоде из антимонида индия (JnSb).

Возможность получения омического контакта на воздухе, малая длительность лазерных импульсов обработки - впавления и следования импульсов, высокое качество контактов обуславливают высокую производительность, так как время изготовления контактов уменьшается в 15-60 раз.

Исключение из линии сборки вакуумного или гальванического оборудования, уменьшение брака продукции, снижение трудоемкости, возможность автоматизации позволяют уменьшить стоимость изготовления омического контакта типа металл - полупроводник на туннельном диоде из антимонида индия.

Ни один из известных названных выше методов получения омического контакта типа металл - полупроводник на туннельном диоде из антимонида индия не обладает вышеуказанным сочетанием преимуществ.

Для проверки качества омических контактов использовалась методика измерения динамических и статических вольтамперных характеристик контактов в различных режимах.

Проверка качества омических контактов типа металл - полупроводник на туннельных диодах из антимионида индия, изготовленных с использованием предложенного метода, осуществлена с помощью измерения динамических и статических вольтамперных характеристик туннельных диодов и датчиков Холла. Результаты проверки показали, что переходное сопротивление омического контакта к базовому материалу туннельного диода мало (меньше 1 Ом) и не обладает выпрямляющим действием (рис.2.6).

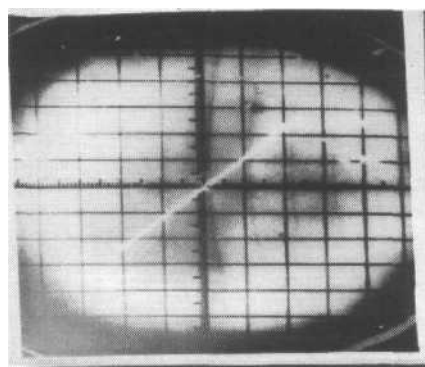


Рис.2.6

Таким образом, использование лазерной технологии позволяет получить механически и электрически надежный омический контакт к JnSb, имеющий малую площадь, точное месторасположение и линейную вольтамперную характеристику.

2.3.3. Технология получения полупроводниковых плёнок антимонида индия (JnSb) методом дискретного распыления.

Известны различные методы получения тонких плёнок соединений типа A_3B_5 . Эти соединения при нагревании могут разлагаться на составные компоненты, и вследствие разной упругости паров этих компонентов трудно получить плёнку стехиометрического состава путём обычного термического испарения в вакууме сплавов этих соединений.

Вследствие указанной особенности для получения плёнок сплавов, содержащих компоненты отличающиеся друг от друга по давлению паров, применяются следующие методы:

1. метод катодного распыления;
2. метод Векшинского;
3. метод трёх температур;
4. метод дискретного распыления.

Коротко рассмотрим каждый из этих методов.

1. Процесс получения тонких плёнок методом катодного распыления заключается в использовании явления разрушения катода под действием его бомбардировки ионизированными молекулами газа. Такое разрушение происходит по всей поверхности катода, покрытой разрядом, и может осуществляться при давлении от 1,0 до 10^{-2} мм Hg. Частицы распылённого материала летят во все стороны, покрывая находящиеся под колпаком детали и стенки колпака или возвращаясь к катоду в результате столкновения с молекулами газа.

2. Метод Векшинского разработан для получения бинарных соединений путём одновременного испарения составных частей сплава из нескольких источников на холодную подложку.

Установлено, что при этом электрические свойства тонких плёнок JnSb сильно отличаются от свойств массивных образцов этих соединений и для этих слоёв получены малые значения подвижности носителей заряда.

2. Метод трёх температур (или метод Гюнтера) является усовершенствованием метода Векшинского с целью применения его для получения плёнок из соединений типа A_3B_5 , но лучшего качества.

В этом случае распыление производится на разогретую подложку. Однако такое испарение практически затруднено из-за необходимости регулирования и поддержания скоростей испарения отдельных компонентов для получения заданного состава плёнки.

Для того чтобы тонкие плёнки, полученные выше изложенными методами имели свойства близкие к свойствам монокристаллов, в работе J.F.Spivak и J.J.Carrol [16] предлагается отжиг тонких плёнок при температуре плавления JnSb в течение минимально возможного времени.

Рекристаллизация тонкой плёнки JnSb приводит к уменьшению размеров составляющих её кристаллитов, которые дают большие подвижности.

Основным условием, необходимым для проведения рекристаллизации является вакуум не ниже $10^{-5} \div 10^{-6}$ мм Hg, и, кроме того, в качестве подложки нужно использовать такой материал, коэффициент теплового расширения которого соответствует коэффициенту теплового расширения JnSb, чтобы в результате рекристаллизации плёнка не скатывалась в шарик. Таким материалом является BeO, но для нас этот материал непригоден, поскольку вследствие хрупкости BeO толщина такой подложки будет довольно большой.

4.Метод дискретного распыления заключается в том, чтобы непрерывно подавать мелкие частицы сплава нужного состава в раскалённый тигель. Поскольку в испаритель непрерывно поступает большое количество крупинок или частиц сплава, процесс испарения носит статистический характер, и в среднем к подложке прилетает столько же атомов сурьмы и индия, сколько их содержится в исходном сплаве.

Однако получаемые таким методом плёнки по своему химическому составу не будут отличаться от исходного материала лишь при выполнении следующих условий:

а) температура испарителя должна быть такой, при которой происходит полное и достаточно быстрое испарение компонента с низкой упругостью паров;

б) коэффициенты конденсации компонентов, входящих в соединение, должны быть одинаковы;

в) размер частичек и интенсивность испарения должны обеспечивать полное испарение частиц. Частицы не должны выскакивать из тигля после испарения одного из компонентов или скапливаться на более холодных деталях испарителя.

В работе С.А. Семилетова и П.С. Агларзаде [17] для подачи порошка в испаритель использовалось устройство, состоящее из винта 1, вращающегося в неподвижном полом цилиндре 2 (рис.2.7). Порошок засыпался в бункер 3 и при вращении винта выталкивался в жёлоб 4, откуда падал в разогретый тигель. Скорость подачи вещества регулировалась шагом винта и количеством его оборотов в минуту. Вращение осуществлялось с помощью электромоторчика и передавалось под колпак через вильсоновское уплотнение с помощью системы стержней и конических шестерёнок.

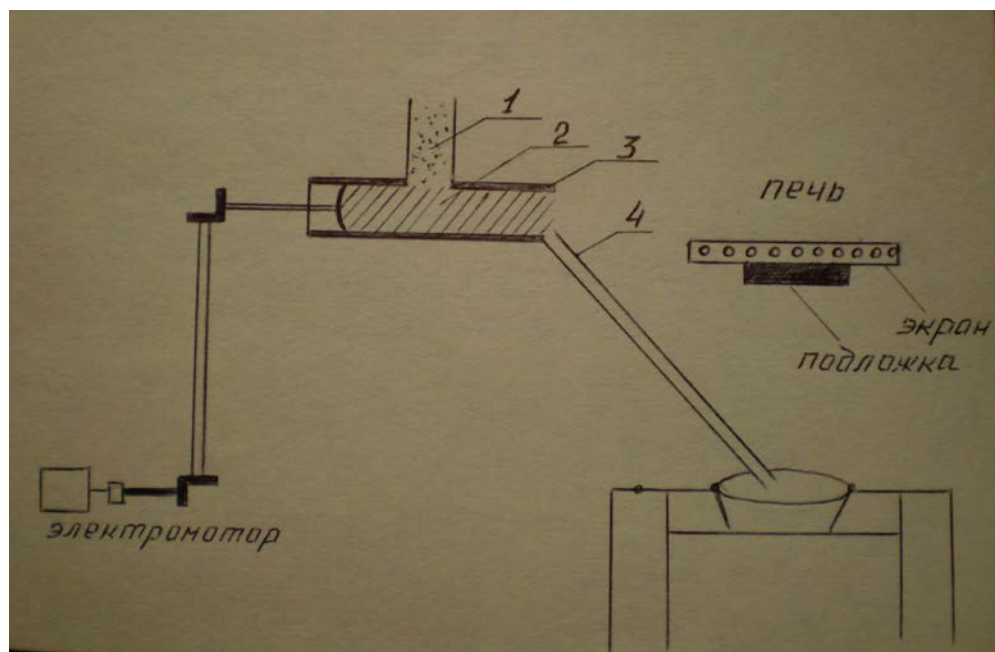


Рис.2.7

В качестве исходного материала использовался монокристаллический антимонид индия электронного типа с концентрацией носителей заряда при температуре жидкого азота равной 10^{22} м^{-3} и подвижностью $5,5 \text{ м}^2 / \text{В} \cdot \text{сек}$.

Независимо от температуры подложки, плёнки, полученные из этого материала, обладали электронной проводимостью, имели толщину порядка $(1,5 - 1) \cdot 10^{-6} \text{ м}$ и при измерении в магнитном поле напряжённостью $16 \cdot 10^4 \text{ А/м}$ имели подвижность электронов $(1,5 - 2) \text{ м}^2 / \text{В} \cdot \text{сек}$.

В основу технологии изготовления датчиков Холла в настоящей работе был принят метод дискретного распыления.

Однако, конструкция, описанная в работе этих авторов, на наш взгляд обладает определёнными недостатками, важнейшими из которых следует считать наличие вильсоновского уплотнения, неизбежно ухудшающего вакуум.

Поэтому было предложено, сконструировано и изготовлено устройство для дискретного распыления с электромагнитным вибратором, функциональная схема которого приведена на рис. 2.8.

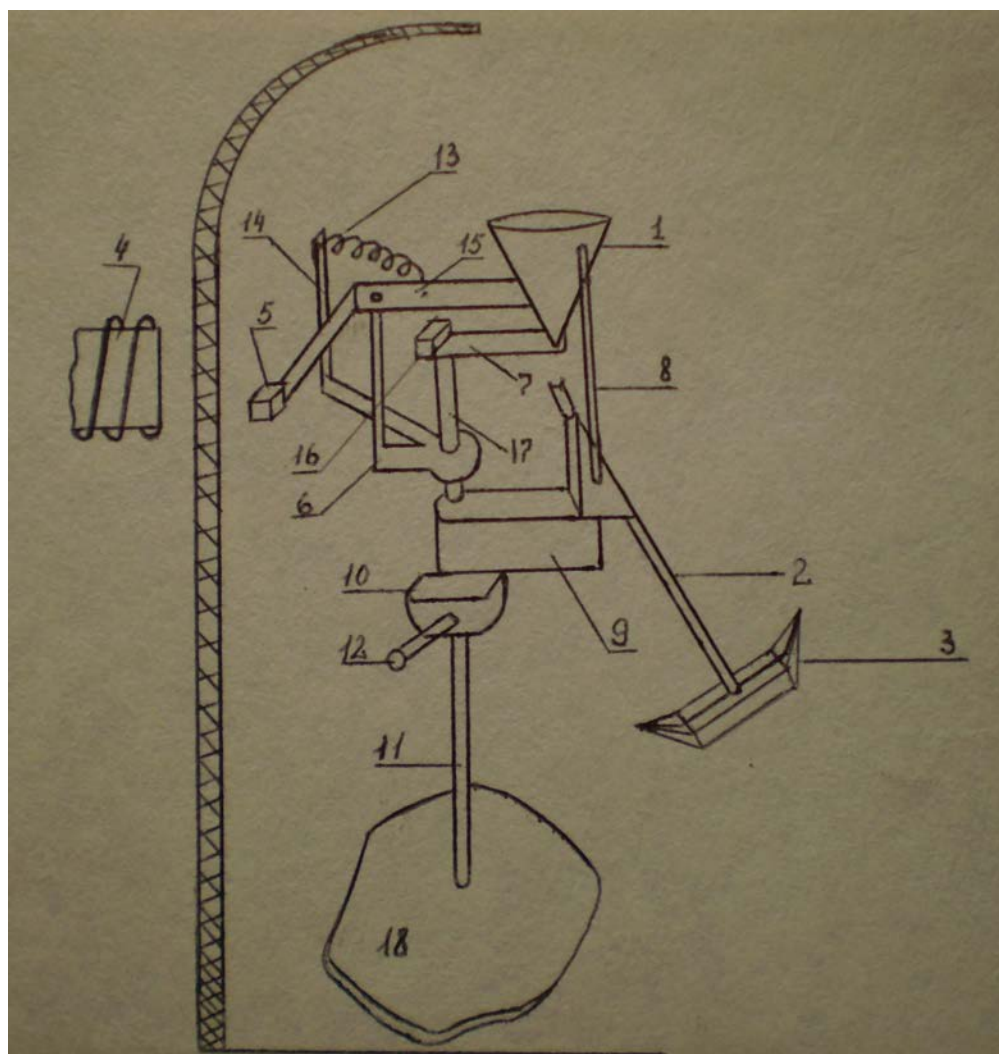


Рис.2.8

Это устройство состоит из воронки 1, содержащей мелко размолотый порошок InSb , у выхода воронки помещается наклонная пластинка, согнутая в виде лотка 2 и направляющая частицы InSb в молибденовый испаритель 3, нагретый до температуры испарения сплава.

Для поддержания равномерного потока частиц с наружной стороны вакуумного колпака помещается электромагнит вибратора 4, который заставляет колебаться якорь вибратора 5, жёстко связанный с воронкой и лотком, а также с помощью якоря 6 осуществляет поворот вокруг оси флажка 7, открывающего входное отверстие воронки. Воронка с лотком с помощью стоек 8 крепится на кронштейне 9, соединённом в свою очередь с муфтой 10. Эта муфта позволяет передвигать воронку с лотком вверх-вниз и поворачивать вокруг опорного стержня 11. Положение лотка относительно испари-

теля фиксируется с помощью винта 12. Противодействующий момент подвижной части вибратора осуществляется с помощью спиральной пружины 13, один конец которой закреплён на неподвижной консоли 14, а другой на рычаге 15, передающем вибрацию от якоря 5, к воронке 1. Неподвижные консоли 14, 16, 17 крепятся к опорному стержню 11, который ввинчен в плиту 18. Воронки диаметром 20 мм и высотой 20 мм изготавливались из пермаллоя с диаметром нижнего отверстия (0,3; 0,4; 0,5; 0,6) мм в зависимости от размеров крупинки порошка InSb.

В данной работе испарителем для антимонида индия служила молибденовая лодочка площадью (16×24) мм² и толщиной 0,2 мм.

При выборе материала испарителя учитывалось, что:

1. давление пара материала подогревателя должно быть пренебрежимо мало при рабочих температурах испарения;
2. испаряемый материал в расплавленном состоянии должен хорошо смачивать материал подогревателя, создавая хороший тепловой контакт;
3. между материалом подогревателя и испаряемым материалом не должно происходить никаких химических реакций, а также не должны образовываться сплавы этих веществ.

При дискретном распылении одно из основных затруднений состоит в выборе температуры испарителя: при слишком высокой температуре частицы сплава отражаются от испарителя, не успевая расплавиться, при слишком же низкой температуре испарителя может происходить частичное испарение одной из компонент, т.к. на лодочке остаётся часть порошка.

Таким образом, температура испарителя должна быть достаточно высокой для того, чтобы частицы сплава немедленно испарялись, как только коснутся поверхности испарителя.

Такой экспериментально подобранной температурой испарителя оказалась температура 1000-1100 °С. При этой температуре частицы по-

рошка антимонида индия (InSb), едва долетев до испарителя, начинают интенсивно испаряться.

Однако, вследствие относительно низкой температуры плавления антимонида индия (525°C) на конце жёлоба происходит накопление порошка и в конце концов подача порошка в тигель прекращается. Чтобы этого не происходило, жёлоб нужно регулярно очищать спиртом. Для осуществления непрерывной и регулярной подачи порошка в испаритель имеет большое значение размер его зёрен. Порошок необходимо просеивать и отбрасывать наиболее мелкую фракцию (пыль), которая под ударом струи пара легко спрессовывается, накапливаясь на конце жёлоба, затем падает в испаритель в виде большого комка, что ведёт к нарушению режима испарения.

Структура плёнки в значительной мере зависит от температуры подложки.

Исследования структуры плёнок на электронографе и металлографическом микроскопе МИМ -8 показывают, что при напылении плёнки на подложку при комнатной температуре, в большинстве случаев получается мелкокристаллическая структура, а при напылении на подогретую до определённой температуры подложку образуются более крупные кристаллы. Особенно сильно размеры кристаллитов увеличиваются в области температур подложки от 440° до 450°C . Помимо температуры подложки размер кристаллитов в плёнках InSb сильно зависит и от толщины плёнки: чем толще плёнка, тем больше при прочих равных условиях размер кристаллитов в ней. Эту зависимость можно заметить и без микроскопа, поскольку мелкокристаллические плёнки имеют ровную зеркальную поверхность, а поверхность крупнокристаллических плёнок матовая, шероховатая. Образование плёнок с шероховатой поверхностью происходит при температуре подложки выше 400°C . Однако если посмотреть на такую плёнку со стороны подложки, то она имеет такой же зеркальный вид, как и плёнки, полученные при комнатной температуре подложки.

Очевидно, и при высокой температуре подложки на её поверхности образуется множество мельчайших кристалликов, которые затем разрастаются в относительно крупные кристаллиты (1- 5) мм, т.е. действует обычный принцип геометрического отбора. Таким образом, необходимо тщательно контролировать температуру подложки и следить, чтобы она равномерно нагревалась по всей площади. С этой целью в качестве подогревателя подложки нами использовалась следующая конструкция: на прямоугольный кусок слюды равномерно наматывается молибденовая проволока диаметром $0,2 \cdot 10^{-3}$ м и сопротивлением 5 Ом. Затем слюда с намотанной проволокой помещается в корпус, изготовленный из пермаллоя. Сверху проволока тщательно изолируется от корпуса слюдой. Размеры корпуса соответствуют размерам держателя. В качестве подложки нами использовалась телевизионная слюда типа мусковит, выбор которой обусловлен тем, что она может быть сделана очень малой толщины до (5 – 10) мкм, выдерживает температуру, необходимую для термообработки тонких плёнок и на её поверхности можно образовывать прочные и стабильные слои. Кроме того, слюде легко можно придать нужную форму.

Для получения тонких плёнок антимонида индия использовались монокристаллические слитки n-InSb с концентрацией примесей (2-3) 10^{21} м^{-3} . Перед тем, как приступить к приготовлению мелкодисперсного порошка из слитка, его поверхность очищалась от загрязнений в травителе CP – 4. после травления слиток промывался в дистиллированной воде и спирте и высушивался в вакуумном сушильном шкафу. Обработанный таким образом слиток размельчался в агатовой ступе агатовым пестиком, т.к. ввиду значительной твёрдости материала ступки при дроблении в ней в получаемый порошок не должно попадать загрязнений. Получаемый порошок просеивался через набор сит с разными наборами ячеек.

Экспериментально было найдено, что плёнки лучшего качества получаются из порошка размерами (200 – 160) мкм и (160 – 100) мкм. Для по-

лучения плёнок толщиной ~ 5 мкм порошок перед напылением развешивался на аналитических весах типа АДВ – 200 по 50 мг для каждого напыления.

Перед напылением порошок InSb засыпался в воронку, нижнее отверстие которой закрыто заслонкой до того момента, когда испаритель нагреется до температуры, при которой производится испарение $(1050 - 1100)^\circ \text{C}$.

Затем якорем 6 заслонка открывается и порошок просыпается в разогретый испаритель. Испаритель предварительно подвергается отжигу при температуре выше, чем температура испарения InSb, чтобы очистить поверхность испарителя от примесей. Контроль температуры испарителя осуществляется с помощью платина – платинородиевой термопары, дающей высокую точность в требуемом интервале температур.

Плёнки антимонида индия напылялись через слюдяной трафарет на слюдяную подложку, прогреваемую предварительно печкой в течение 10 мин при температуре $(355 - 360)^\circ \text{C}$. Печка отжигалась при температуре 550°C и градуировалась хромель – алюмелевой термопарой в интервале температур $(100 - 500)^\circ \text{C}$.

Обычно при отжиге тонких плёнок непосредственно после нанесения их в вакууме происходят изменения в структуре этих плёнок за счёт диффузии In и Sb; размеры зёрен увеличиваются, получается укрупнение кристаллитов плёнки, связь между ними усиливается и плёнка получается более плотная и компактная, а её удельное электрическое сопротивление уменьшается. Кроме того, отожжённые плёнки отличаются большой твёрдостью, механической прочностью, а также стабильностью параметров при работе на воздухе. Наилучшие результаты получены термообработкой плёнки при температуре 300°C в течение 1,5 часов.

В некоторых случаях проводилась рекристаллизация плёнки при температуре 525°C .

В качестве материала для электродов чаще всего применяется серебро, которое в нашем случае даёт хороший омический контакт, т.к. работа выхода из тонких слоёв InSb равна 4,42 эВ, а для Ag - 4,55 эВ. Серебряные токовые и холловские электроды наносились на плёнку в другой вакуумной установке распылением химически чистого серебра из вольфрамовой корзиночки через маску, изготовленную фотолитографическим методом из бериллиево-бронзовой фольги. Напыление производилось при давлении $5 \cdot 10^{-4}$ мм Нг и температуре испарителя $\sim 1000^{\circ}\text{C}$, на холодную подложку.

Во время напыления плёнок контролировались их некоторые параметры. Для этого, одновременно с основными плёнками, напылялись 3 контрольных датчика с пятью электродами (рис. 2.9). Полученные плёнки представлены на фотографиях (рис 2.9, рис. 2.10).

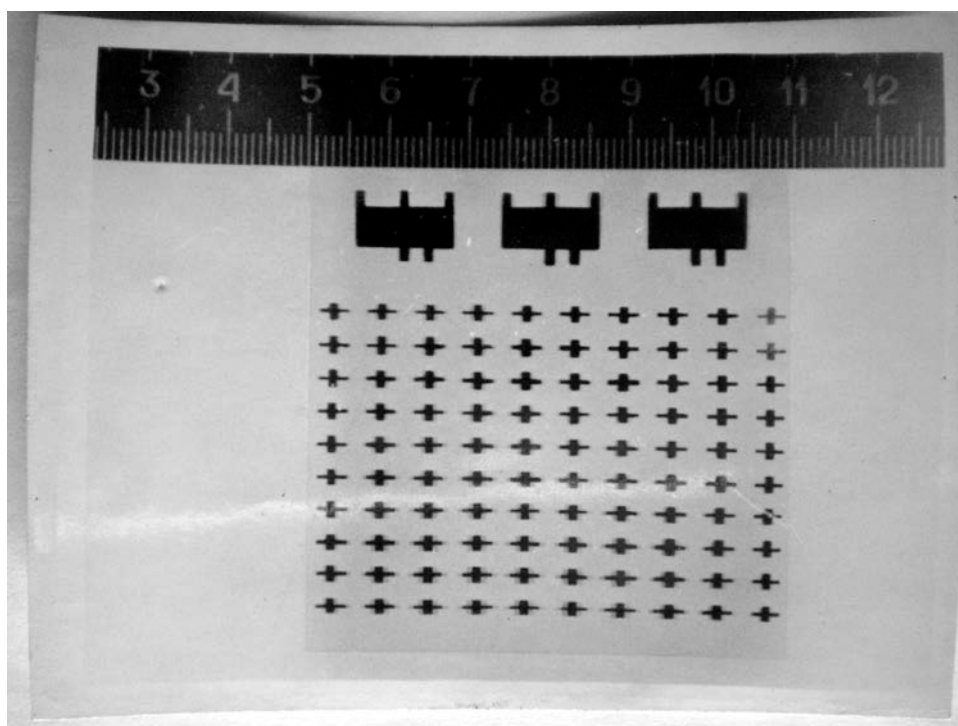


Рис. 2.9

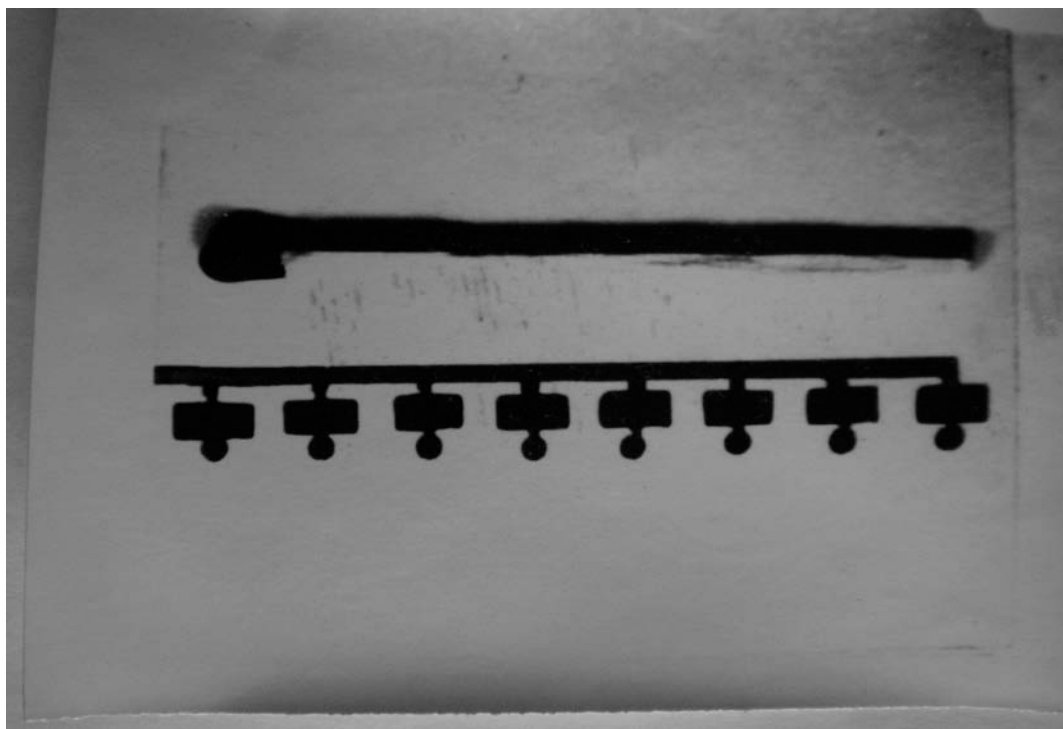


Рис.2.10

В качестве проводников, припаиваемых к электродам, использовалась медная фольга толщиной 30 мкм, нарезанная узкими полосками шириной 10^{-3} м, предварительно обезжиренная в дихлорэтано, промытая в спирте и зачищенная с обоих концов или медная проволока марки ПЭЛШО диаметром (0,12 – 0,15) мм. Пайка производилась индием маленьким точечным паяльником, который разогревался до температуры плавления индия (165° С). Перед пайкой фольгу протравливали в паяльной кислоте и проводили лужение индием.

На серебряные контакты плёночных датчиков Холла наносили по маленькой капельке In , накладывали на неё залуженную полоску медной фольги и прогревали точечным паяльником в течение 2-3 секунд. Спай серебряных контактов с медной фольгой получался механически прочным и не давал запирающего слоя. Иногда датчик Холла с припаянными электродами заклеивался сверху телевизионной слюдой, имеющей размеры подложки датчика с помощью клея БФ – 4. После заклейки датчик сушился на воздухе в течение 30 минут.

Датчики Холла кристаллические и плёночные и датчики магнито-сопротивлений использовались в различных устройствах, которые мы будем рассматривать в следующих главах.

Одной из основных задач полупроводниковой микроэлектроники в области приборостроения является изготовление надёжных приборов, способных работать в течение длительного времени при экстремальных климатических условиях. Поэтому проблемным вопросом микроэлектроники является создание одновременной пассивации и защиты поверхности активных элементов полупроводниковых датчиков, что обеспечивало бы надёжную работу этих датчиков.

В качестве объекта исследования использовались плёночные датчики Холла из антимонида индия. Датчики Холла были получены методом дискретного распыления антимонида индия в вакууме с последующей рекристаллизацией. В качестве подложки датчика использовалась телевизионная слюда. Общая толщина плёнки с подложкой не превышала 20 мкм.

Из существующих покрытий датчиков были выбраны органические, преимуществами которых являются простота технологии нанесения защитного слоя и относительно низкая температура последующей полимеризации. Исследовались покрытия на основе ЭД – 3, МБК – 1, МБК – 2, КО – 97, КЛТ – 30, цапонлака. Для измерения холловских параметров использовалась установка, собранная по компенсационной схеме. По измеренным величинам ЭДС Холла (U_H) и электропроводности (σ) вычислялись следующие параметры: постоянная Холла (R_x) и подвижность носителей заряда (μ) до и после нанесения покрытия. Последующие испытания проводились на термостойкость, влагостойкость и старение. При этом датчики находились в парах кипящей воды, затем каждый из них помещался в воду при комнатной температуре.

Все испытания и измерения параметров датчиков проводились ежегодно в течение 10 лет. Данные представлены в таблицах 2.4а и 2.4б. На ос-

нове табличных данных и рис. 2.11 можно сделать вывод, что покрытия на основе цапонлака 1, МБК – 1, МБК -2 не ухудшают параметры датчиков в пределах ошибки измерения, а покрытия на основе КО – 97, ЭД – 3, КЛТ -30 не оказывают защитного действия на параметры датчиков.

Таблица 2.4а

Наименование покрытия	Параметры датчиков до нанесения покрытия			Параметры датчиков после нанесения покрытия			Параметры датчиков после испытания на влагостойкость		
	R _x	μ	σ	R _x	μ	σ	R _x	μ	σ
Цапон лак	213;	1468;	6,9;	220;	1480;	6,3	215;	1397;	6,5;
Цапон лак	628;	1318;	2,1	740;	1386;	2,0	751;	1402;	2,0;
МБК-2	220;	263;	1,2;	235;	235;	1,0	210;	252;	1,2;
МБК-1	438;	391;	6,8;	430;	344;	0,8	407;	325;	0,8;
КЛТ-30	185;	223;	1,2;	180;	180;	1,0	118;	118;	1,0;
КЛТ-30	538;	3927;	7,2;	526;	3234;	6,1	515;	2575;	5,0;
КО-97	16,6;	78;	5,4;	9,5;	51,6;	5,4	10;	40;	4,0
ЭД-3	180;	216;	1,2	170;	200;	1,3	100;	181;	16

Таблица 2.4б

Наименование покрытия	Параметры датчиков после одного года ста- рения в естественных условиях			Параметры датчиков после 10 лет старения в естественных условиях		
	R_x	μ	σ	R_x	μ	σ
Цапон-лак	212;	1981;	8,4;	212;	1981;	8,4;
Цапон-лак	793;	2263;	2,3;	793;	2263;	2,3;
МБК-2	115;	115;	1,0;	115;	115;	1,0
МБК-1	402;	281;	0,7;	402;	281;	0,7;
КЛТ-30	2,5;	3,75;	1,5;	2,5;	3,75;	1,5;
КЛТ-30	450;	820;	1,7;	450;	820;	1,7;
КО-97	9,5;	43;	4,0;	9,5;	43;	4,0;
ЭД-3	60;	90;	1,5;	60;	90;	1,5;

В таблицах 2.4а и 2.4б величины указаны в следующих единицах:

постоянная Холла R_x в $\text{см}^3/\text{Кл}$; подвижность электронов μ_n в $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{сек}$;

электропроводность σ в $(\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$.

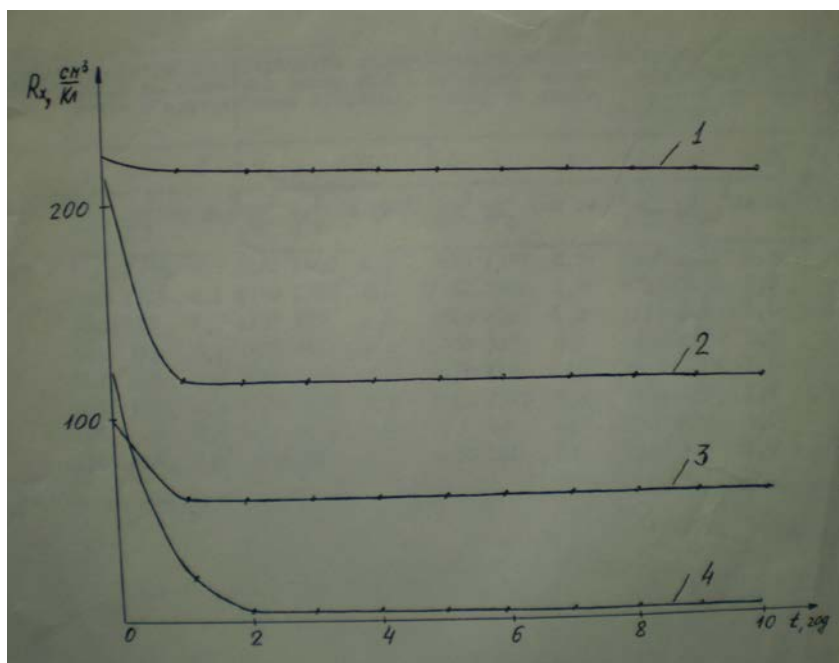


Рис. 2.11

Неэффективность покрытий на основе КО – 97, ЭД -3, КЛТ – 30 можно объяснить присутствием в составе этих покрытий двуокиси титана, а также значительных концентраций ионов хлора и натрия. Наличие таких активных элементов, по-видимому, обуславливает электронно-ионные процессы на поверхности полупроводника, что приводит к ухудшению параметров датчиков. В соединениях МБК – 1, МБК – 2 и цапонлаке отсутствуют такого рода примеси, что сказывается на их эффективном действии в качестве защитных покрытий.

Следовательно, при выборе соединения для защитного покрытия датчиков необходимо учитывать не только степень чистоты, простоту технологии нанесения, но и физико-химическую активность составных групп и частиц состава покрытия в условиях наличия высоких температур, уровней влажности и электрических полей.

Результаты работы позволяют сделать следующие выводы: защитное покрытие на основе цапонлака эффективно защищает плёночные датчики Холла и может быть рекомендовано в качестве защиты их от вредного действия окружающей среды и для улучшения механической прочности.

2.4. Экспериментальное исследование параметров плёночных датчиков Холла, используемых для измерения магнитных полей.

Исследование плёночных датчиков производилось в четыре этапа:

1. исследование основных параметров датчиков в постоянном магнитном поле и на постоянном токе, целью которого является проверка качества напыляемых плёнок;
2. измерение выходного напряжения датчиков в переменном магнитном поле частотой 400 Гц.
3. выборочные климатические испытания датчиков для определения термической стабильности основных параметров датчиков в рабочем интервале температур.

Ниже следует краткое описание методики исследований датчиков по этапам.

1. Исследование на постоянном токе и в постоянном магнитном поле проводилось на установке, функциональная схема которой приведена нарис.2.12.

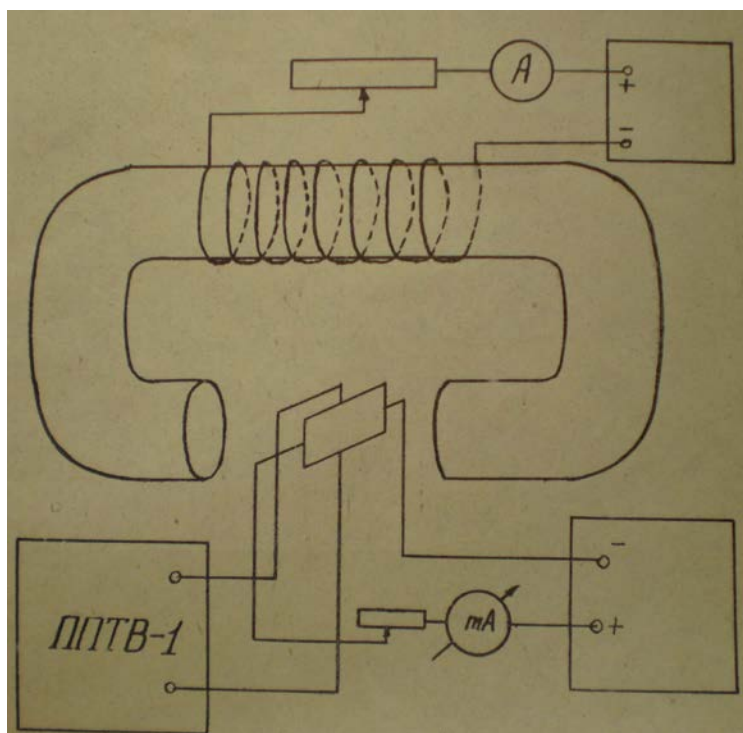


Рис. 2.12

Специально изготовленный электромагнит позволял плавно изменять его воздушный зазор с помощью микровинта. Регулировка напряжён-

ности магнитного поля осуществлялась изменением тока подмагничивания обмотки возбуждения. Для некоторых фиксированных значений воздушного зазора (δ_0) составлялись градуировочные кривые $H = f(I)$. Градуировка производилась с помощью магнитометра ИМИ-3, с помощью этого электромагнита производились испытания в сильных полях при напряжённостях поля порядка $8 \cdot 10^4$ А/м и выше.

Измерения в слабых полях производились с помощью соленоида (фото рис.2.13).

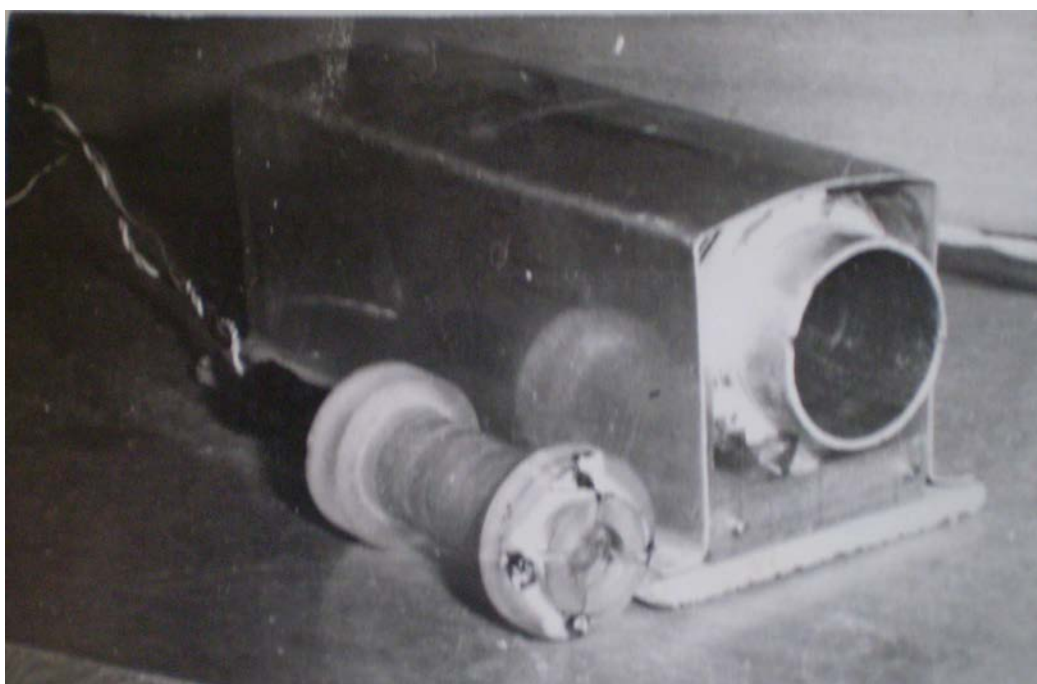


Рис. 2.13

Напряжённость магнитного поля внутри соленоида в зависимости от величины тока, протекающего по обмотке, была рассчитана и затем проверена с помощью магнитометра ИМИ -3.

В качестве измерителя ЭДС Холла в обоих случаях применялся потенциометр постоянного тока ППТВ – 1 с нуль прибором типа М91/ А. Большое входное сопротивление ППТВ-1 в момент компенсации позволило измерять ЭДС, начиная с долей милливольт с высокой точностью. В качестве измерителей тока использовались приборы типа ЛМ – 1.

Эти измерения проводились, в основном, для корректировки технологии изготовления плёночных датчиков Холла.

2. Измерение выходного напряжения датчиков в магнитном поле частотой 400 Гц производилось по функциональной схеме, приведённой на рис.2.14. На рис. 2.15 представлен общий вид установки.

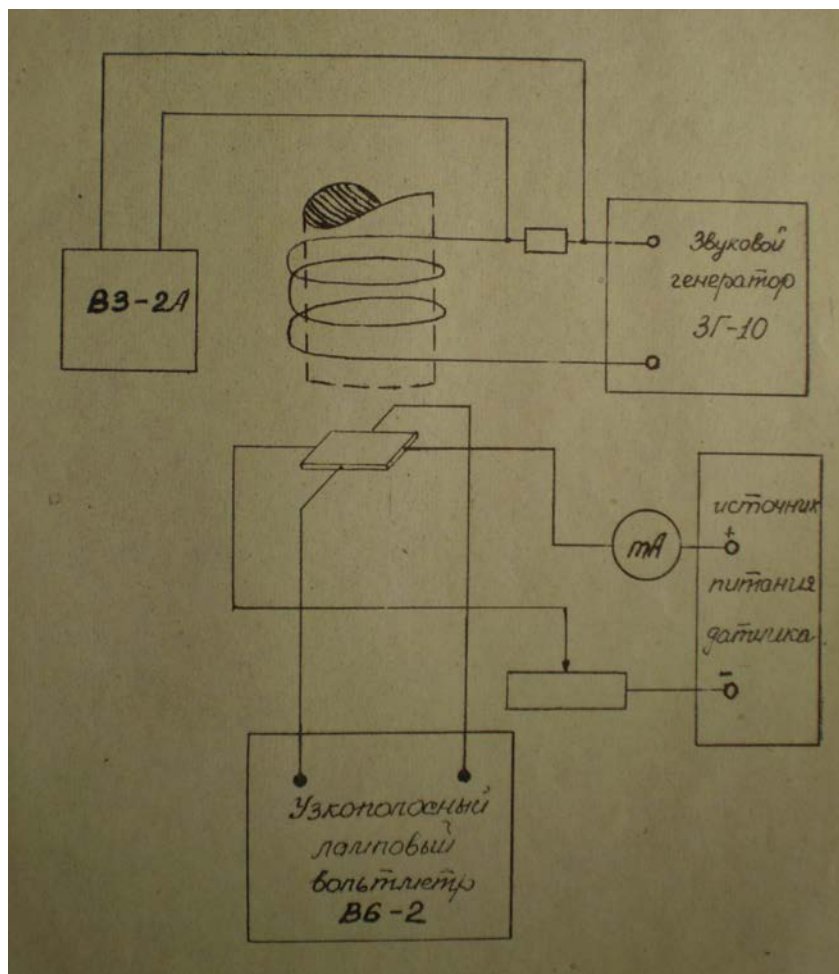


Рис. 2.14

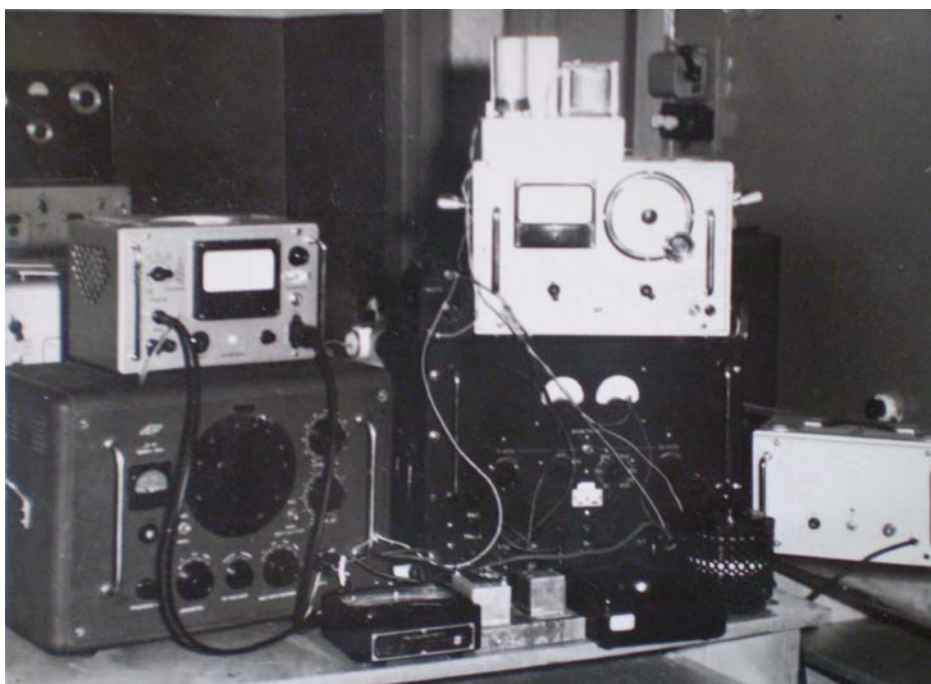


Рис.2.15

Магнитная система здесь представляет собой ферритовый магнитопровод с воздушным зазором $\delta = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м и обмоткой возбуждения, работающей от звукового генератора ЗГ-10.

Для контроля величины тока, текущего по обмотке возбуждения, использовался резистор сопротивлением 1 Ом, включённый последовательно с обмоткой, и ламповый милливольтметр ВЗ – 2А, измерявший падение напряжения на этом резисторе.

Зависимость напряжённости магнитного поля в зазоре от тока подмагничивания снималась с помощью градуировочного датчика Холла, который, в свою очередь, градуировался в поле соленоида по схеме рис. 2.12 с помощью прибора ИМИ – 3. Градуировочный график приведён на рис. 2.16.

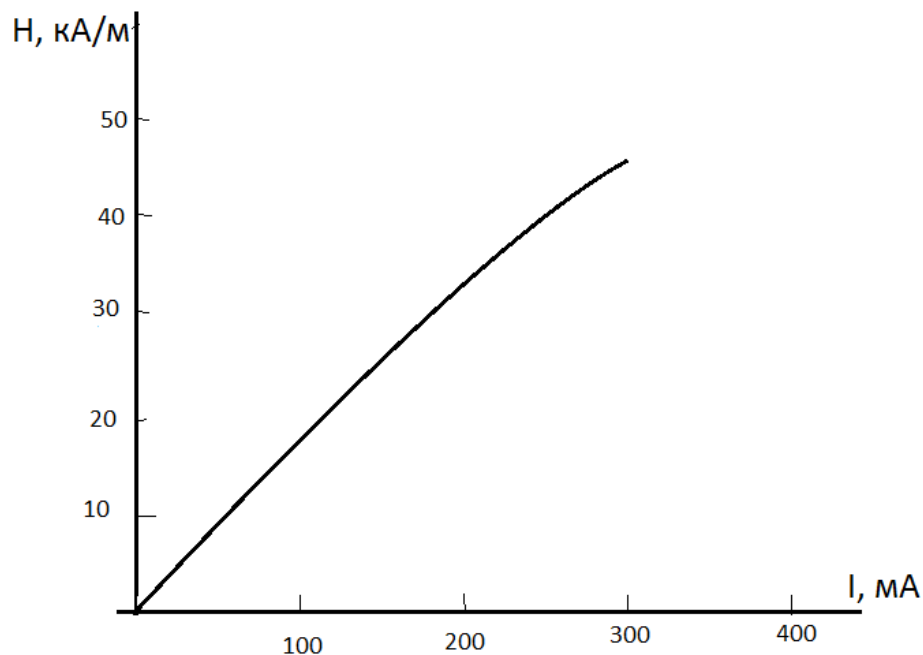


Рис. 2.16

В качестве измерителя напряжения Холла применялся узкополосный микровольтметр В –6-2. Следует отметить, что в качестве измерителя в этой схеме может быть применён любой электронный милливольтметр, но при этом увеличиваются погрешности измерения за счёт наводок, влияние которых будет особенно велико при измерении в слабых полях. В случае применения узкополосных измерителей пропорциональность сохраняется вплоть до полного снятия магнитного поля. При построении зависимости ($U_H = f(H)$) при $I_{\text{датч.}} = \text{Const}$, кривая практически начинается с нуля.

По описанной методике проверялись все изготавливаемые датчики. С целью экспериментальной проверки зависимости $U_H = f(H)$ и степени её линейности для нескольких датчиков она снималась по точкам в диапазоне напряжённостей магнитного поля от 0 до 44000 А/м. Результаты приведены на рис.2.17, который свидетельствует о линейности зависимости $U_H = f(H)$. При этом ток через датчик был равен 10 мА, который не является предельным. Поэтому фактическая вольтовая чувствительность датчиков может быть выше.

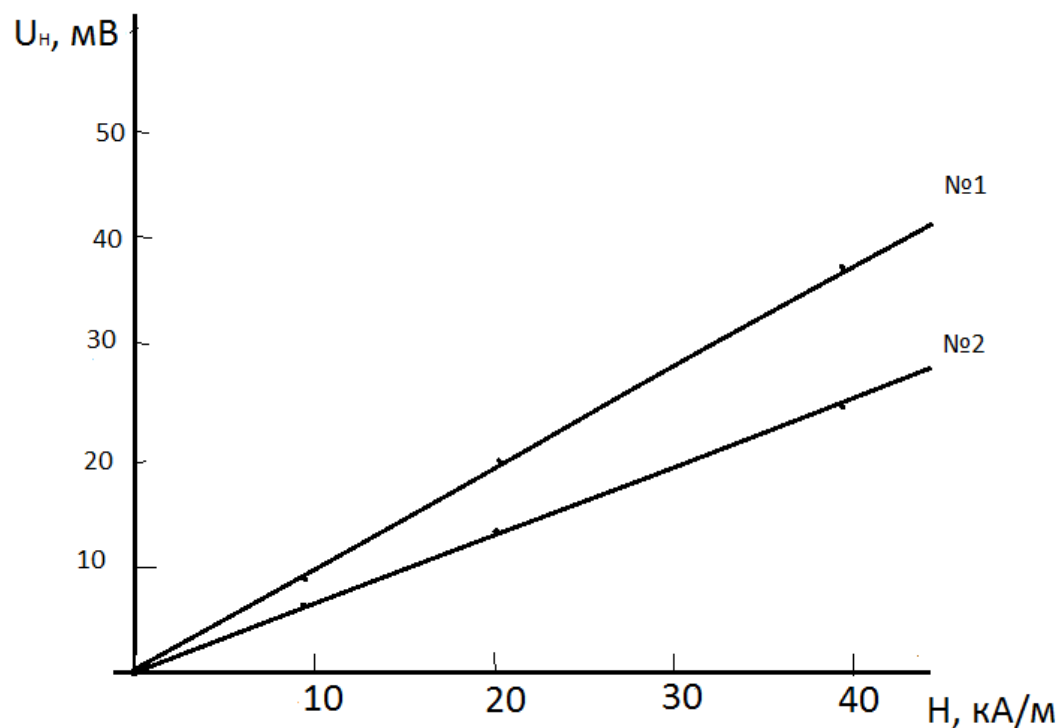


Рис. 2.17

3. Несколько датчиков непосредственно испытывалось в магнитном зазоре таходатчика электродвигателя ДПМ-25-Н6-02. При токе через датчик 10 мА, величина выходного напряжения составила 0,1 вольта.

4. Выборочные климатические испытания плёночных датчиков проводились с целью проверки термостабильности основных параметров датчиков.

С этой целью был изготовлен небольшой термостат с подогревателем, позволявший измерять температуру в пределах от комнатной до 50°C . Температура в термостате измерялась ртутным термометром со шкалой от 0 до 60°C . Для измерений в области отрицательных температур рабочий объём термостата заполнялся сухим льдом, т.е. твёрдой фазой углекислого газа, и, таким образом, получалась отсчётная точка -55°C .

Термостат вместе с находящимся в нём датчиком помещался в зазор электромагнита, затем производились измерения по схеме на рис.2.14

.Установка для климатических испытаний приведена на рис. 2.18 и 2.19. Результаты измерений представлены на графиках рис.2.20. Значение U_{H0} соответствует ЭДС Холла данного датчика при $t=20^0$ С.



Рис. 2.18



Рис. 2.19

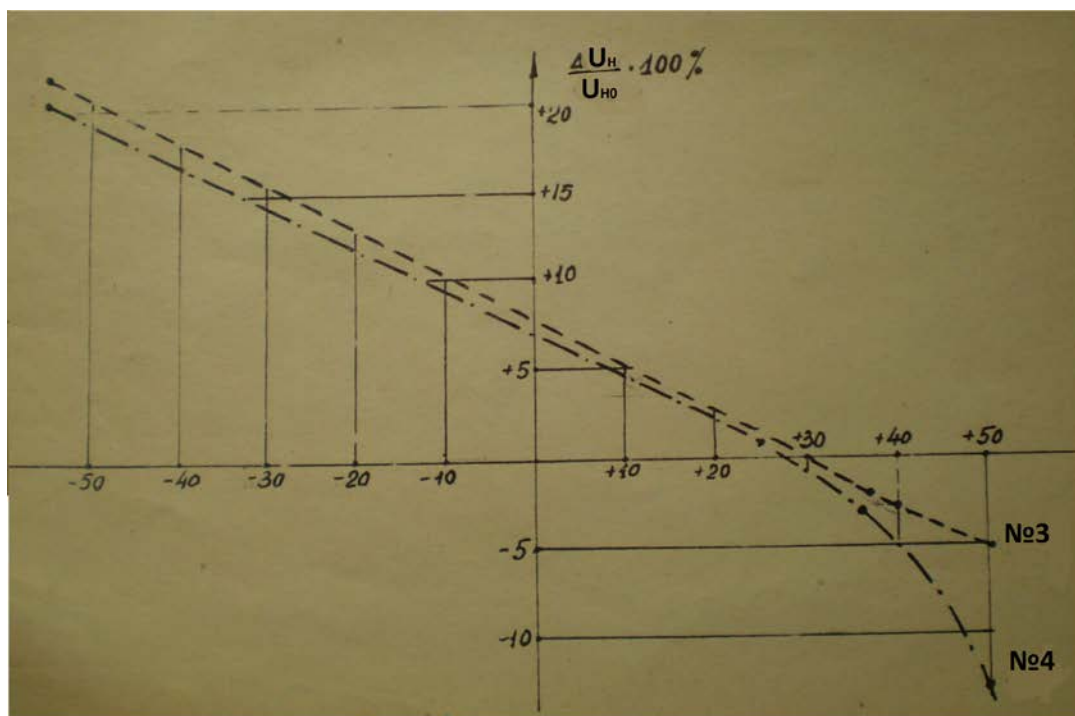


Рис. 2.20

Таким образом, плёночные датчики Холла из антимолида индия могут быть успешно использованы для измерения слабых магнитных полей в диапазоне температур от -50°C до $+50^{\circ}\text{C}$.

2.5. Термостабильный зонд из кристаллических датчиков Холла для измерения напряжённости продольных магнитных полей.

На практике часто бывает необходимо измерять напряжённость продольных магнитных полей, например в соленоиде, в магнитных фокусирующих системах и т.д. При этом от датчика требуется высокая температурная стабильность чувствительности. Используя рекомендации раздела 2.1, был разработан зонд с требуемой термостабильностью. При этом пришлось допустить некоторое уменьшение вольтовой чувствительности.

Конструкция зондов predeterminedена их назначением: измерение продольного магнитного поля фото рис.2.21. Пластинки для датчиков Холла наклеивались на торец керамического стержня клеем БФ-2. После припайки выводов к пластинкам керамический стержень помещался в трубку из немагнитного материала.



Рис. 2.21

Диаметр зонда с датчиком Холла не превышал 4мм, длина зонда не менее 45см, размеры датчика не превышали $(2 \times 0,7 \times 0,15) \cdot \text{мм}^3$. Экспериментальное исследование параметров зондов проводилось по компенсационной схеме, которая обычно используется для исследования эффекта Холла.

Измерения проводились при температурах -77°C , $+20^{\circ}\text{C}$ и $+120^{\circ}\text{C}$. При данной температуре зонд выдерживался в течение 20 мин. Для получения низких температур использовался сухой лёд, который помещался в изготовленную специально для этой цели камеру из мелкопористого пенополистирола. Камера размещалась между полюсами магнита.

Для получения высоких температур использовалась трубчатая печь, которая также размещалась между полюсами магнита. Контроль температуры осуществлялся термопарой медь – константан. Питание датчика осуществлялось через магазин сопротивлений Р- 33 от батареи БАС – Г80 –

У21, ток измерялся миллиамперметром постоянного тока, ЭДС Холла регистрировалась фотокомпенсационным усилителем Ф – 116 / 1.

Результаты измерений некоторых зондов приведены в таблице 2.5

Таблица 2.5

Номер зонда	$n, \text{ м}^{-3}$	Сопротивление неэквивипотенциальности, Ом.	Чувствительность, мВ/А·Тл
1	$2 \cdot 10^{24}$	$0,3 \cdot 10^{-3}$	110
2	$2 \cdot 10^{24}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$	190
3	$2,5 \cdot 10^{23}$	$1 \cdot 10^{-4}$	330
4	$1,5 \cdot 10^{23}$	$1 \cdot 10^{-3}$	1200
5	$2,5 \cdot 10^{23}$	$0,3 \cdot 10^{-3}$	230
6	$1,5 \cdot 10^{22}$	$3 \cdot 10^{-3}$	3000
7	$1 \cdot 10^{23}$	$4 \cdot 10^{-3}$	1400

Одновременно получить высокое значение чувствительности и низкий температурный коэффициент очень трудно. Поэтому необходимо отдать предпочтение одному наиболее важному для данной работы параметру, например, температурному коэффициенту чувствительности, а при данном

магнитном поле увеличить чувствительность зонда можно увеличивая ток через датчик.

Наиболее перспективными в этом отношении являются плёночные датчики Холла, которые наряду с хорошим температурным коэффициентом обладают высокой чувствительностью.

Необходимо также заметить, что также перспективным материалом является теллурид ртути (HgTe), который наряду с низким температурным коэффициентом, обладает и высоким значением чувствительности.

Параметры термостабильных зондов:

1. Диаметр зондов не более $4 \cdot 10^{-3}$ м.
2. Длина зондов $45 \cdot 10^{-4}$ м.
3. Диапазон измеряемых магнитных полей – (0,001 – 0,1) Тл.
4. Чувствительность зондов не менее 500 мВ/А·Тл.
5. Температурный коэффициент ЭДС Холла не более 0,04 %/град в интервале температур (- 70 - + 120)⁰ С.
6. Коэффициент неэквипотенциальности не более $0,5 \cdot 10^{-6}$ В/А.
7. Изменение коэффициента неэквипотенциальности в интервале температур (- 70- +120)⁰С не превышает 0,02 % / град при непрерывной работе зондов в течение 720 часов.

2.6. Высокочувствительный охлаждаемый датчик Холла из сурьмянистого индия для измерения магнитных полей.

Для точного измерения напряжённости магнитного поля в сверхпроводящих катушках были использованы охлаждаемые датчики Холла из арсенида индия с чувствительностью 0,8 В/А·Тл. Датчики Холла, изготовленные из чистого сурьмянистого индия при низких температурах, должны обладать более высокой чувствительностью. Приводятся некоторые характеристики датчиков Холла, изготовленных из InSb n – типа с концентрацией

примеси $8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и подвижностью электронов, равной при 78К (20-30) $\text{м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

Пластинки длиной 10 – 12, шириной 4-6 и толщиной (0,5-1) мм вырезались из монокристалла антимонида индия, полученного методом зонной плавки. Шлифовкой с последующим травлением толщина пластинки доводилась до (0,15- 0,25) мм. Токовые и холловские контакты припаивались к датчикам индием. Для увеличения рассеиваемой мощности и стабильной работы датчика пластинка приклеивалась к подложке с хорошей теплопроводностью. Поскольку в процессе работы датчик неоднократно подвергается резкому охлаждению и нагреванию, подложка должна иметь близкий к InSb коэффициент линейного расширения α (для InSb $\alpha \sim 4 \cdot 10^{-6}$). В качестве подложек вначале были использованы молибден ($\alpha \sim 5,1 \cdot 10^{-6}$) и стекло ($\alpha \sim 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-6}$). Оказалось, что можно использовать также медную подложку ($\alpha = 16,2 \cdot 10^{-6}$), если датчик Холла приклеивать к ней через тонкий (10 – 15) микрон слой слюды. Чтобы уменьшить влияние резких колебаний температуры, датчик Холла вместе с подложкой помещается в герметично закрытый кожух из текстолита или оргстекла. Ниже приводятся результаты измерения характеристик двух датчиков на постоянном токе. Сопротивление датчиков между токовыми электродами равно 15 – 25ом, а между холловскими – 40 – 90ом.

На рис.2.22 показана зависимость ЭДС Холла U_H от величины управляющего тока I при напряжённости магнитного поля $H = 8000 \text{ А/м}$ для датчика 1.

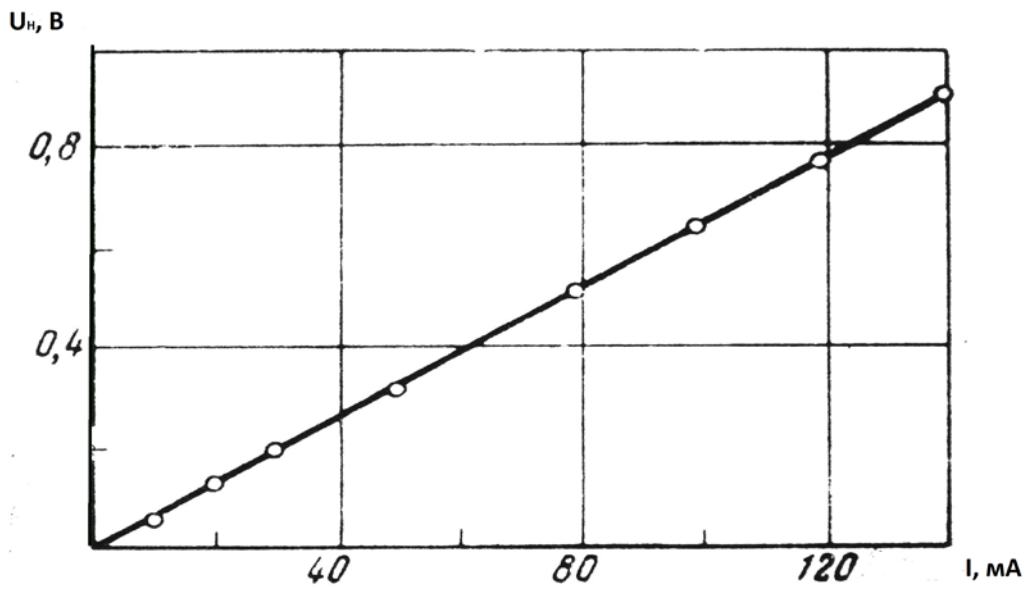


Рис. 2.22

Видно, что эта зависимость линейна вплоть до $I = 150$ mA. Вольтовая чувствительность датчика γ достигает $600 \text{ В/А} \cdot \text{Тл}$. ЭДС Холла при $B = 0,6 \text{ Тл}$, $I = 100 \text{ mA}$ в датчике 1 достигает 14 В (рис. 2.23).

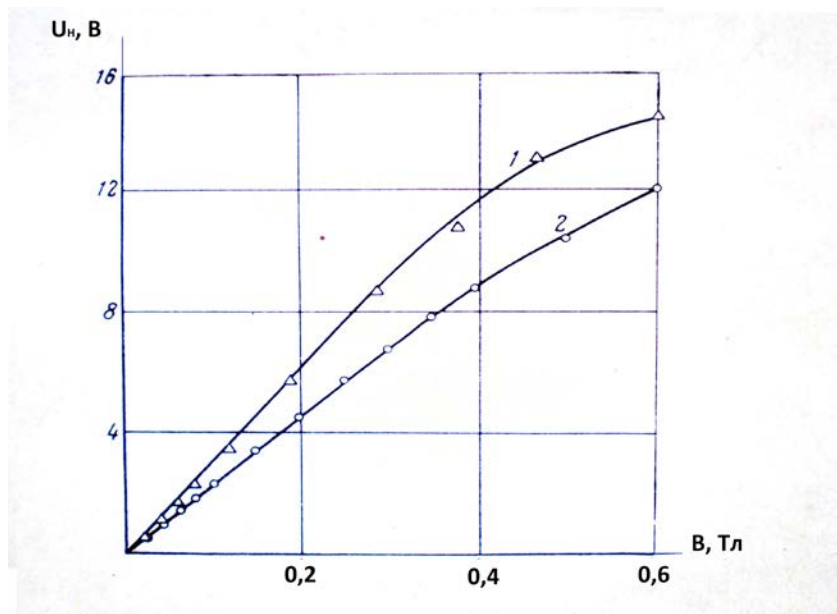


Рис. 2.23

Чтобы показать возможность измерения слабых полей при помощи этих датчиков и оценить точность прибора, приведём результаты измерения магнитного поля Земли. Зависимость среднего значения (линия 1) ЭДС Холла в поле Земли от управляющего тока приводится на рис.2.24.

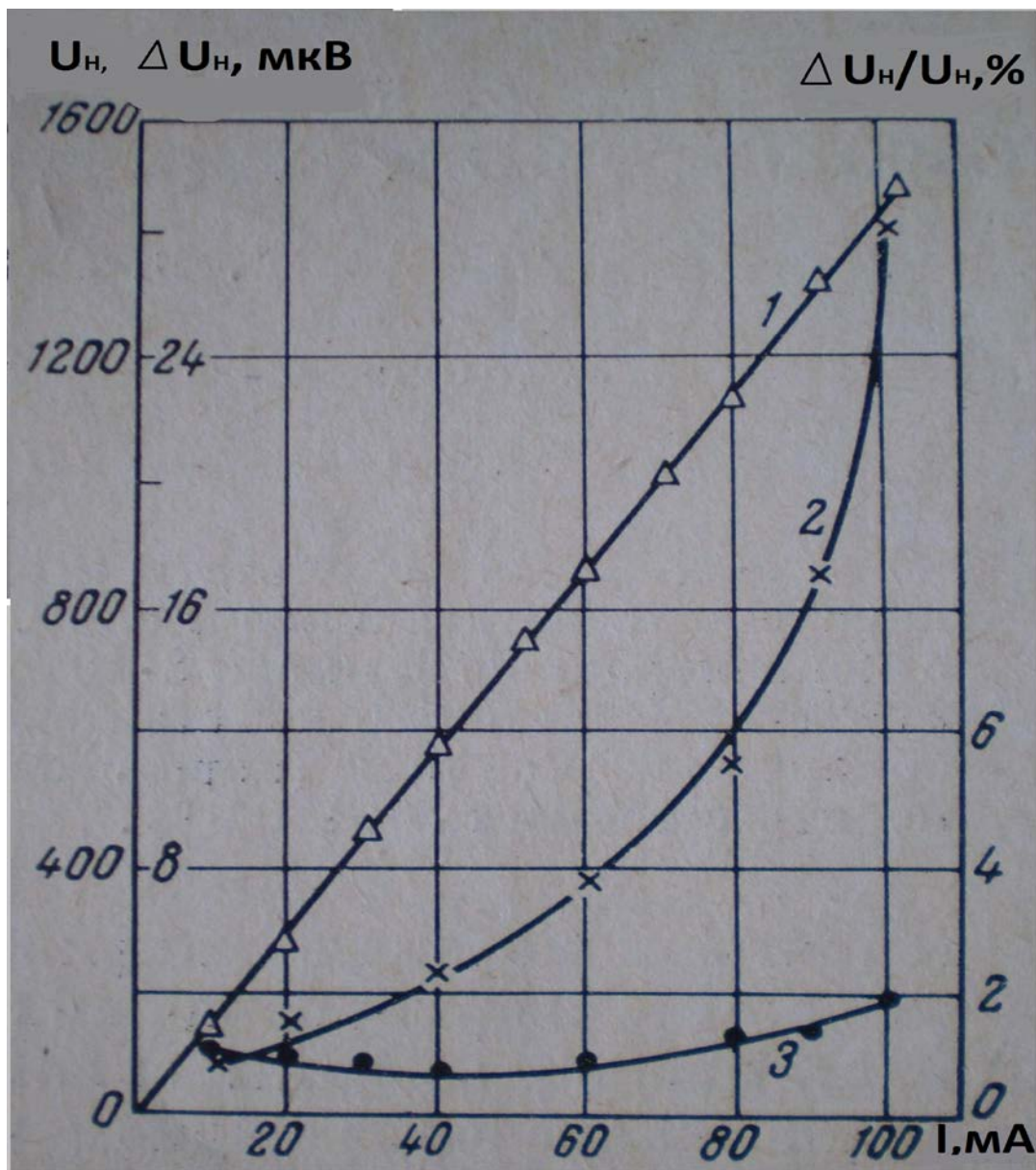


Рис. 2.24

Там же показаны средняя абсолютная погрешность ΔU_H (кривая 2) и относительная ($\Delta U_H / U_H$) погрешность измерений (кривая 3). Видно, что с увеличением управляющего тока ΔU_H быстро растёт. Ошибка измерения при малых токах определяется точностью измерительных приборов, а при больших токах – неравномерным разогревом датчика. При $I = 40$ мА (кри-

вая 3) $\Delta U_H/U_H$, как видно из рис.2.24, имеет минимум. Поэтому это значение тока можно принять за оптимальное для данного датчика. Отсюда найдём пороговую чувствительность датчика

$$B_{\text{пор}}=2 \cdot 10^{-7} \text{ Тл.}$$

Таким образом, применяя охлаждаемый датчик, можно при помощи обычного потенциометра ППТН измерять поля до 0,8 Тл. Поля с индукцией больше 80 Тл можно измерять с достаточно большой точностью.

Глава 3. Приборы и устройства, использующие гальваномагнитные эффекты в диапазоне СВЧ.

3.1 Эффект Холла в диапазоне СВЧ.

В последнее время все большее применение находят датчики Холла как для индикации мощности СВЧ – диапазона, так и для исследования структуры СВЧ полей.

По сравнению с некоторыми другими методами, они имеют преимущества, описанные во введении.

Метод измерения мощности при помощи эффекта Холла, открытого еще в 1879 г., относится к измерениям, основанным на взаимодействии электромагнитного поля с веществом. Основные элементы, образующие вещество, - молекулы, ионы, ядра атомов, элементарные частицы – обладают электрическими, магнитными и механическими свойствами. Эти свойства характеризуются массой, электрическим зарядом и механическими моментами, спином и т.д. Наличие перечисленных свойств и является причиной взаимодействия поля с веществом. Для веществ с различными свойствами это взаимодействие проявляется различным образом. Одним из проявлений этого взаимодействия является эффект Холла. Он наблюдается при одновременном воздействии на вещество взаимно перпендикулярных электрического и магнитного полей. Это приводит к появлению ЭДС Холла в направлении, перпендикулярном электрическому и магнитному полям. В литературе нет систематического описания исследований гальваномагнитного эф-

фекта в полупроводниках в широком диапазоне частот. Высказываются только предположения, что основную роль при этом, особенно в области СВЧ, играет время релаксации носителей заряда τ .

Одно из первых исследований по измерению гальваномагнитного эффекта в полупроводниках на высокой частоте было описано в работе В.Донован [18]. В качестве образца использовался *Ge* *n* – и *p* – типа с удельным сопротивлением ($\rho \approx 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{м}$).

Частота тока при измерении достигала 3 МГц, частота магнитного поля была равна нулю. Во всех случаях получены результаты, не зависящие от частоты в пределах точности эксперимента, причем не было обнаружено сдвига фаз между ЭДС Холла и питающим током. Следовательно, можно считать, что на этих частотах постоянная Холла не зависит от частоты, а датчик Холла является чисто активным сопротивлением. Теоретические исследования гальваномагнитного эффекта в металлах в широком диапазоне частот приведены этим же автором в одной из своих работ.

Если ток в полупроводниковом элементе будет пропорционален току в некоторой линии передачи, магнитное поле пропорционально напряжению и фазовый сдвиг между током и магнитным полем датчика сохранится равным фазовому сдвигу на нагрузке, то усредненная величина ЭДС Холла будет пропорциональна активной мощности, передаваемой по линии. В этом заключается принцип использования эффекта Холла для измерения электрической мощности. Пространственная ортогональность между векторами \vec{E} и \vec{H} электромагнитного поля дает возможность использовать эти компоненты для получения эффекта Холла в полупроводниках, причем ЭДС Холла будет являться мерой потока мощности. Действительно, если через образец полупроводника, помещенный в электромагнитное поле, пропустить ток I , пропорциональный и находящийся в фазе с напряженностью электрического поля \vec{E} , то ЭДС Холла, возникающая при взаимодействии этого тока с полем \vec{H} , будет пропорциональна плотности потока энергии в данной точке поля. Преимуществом метода является то, что мерой потока энергии через

некоторую линию передачи является возникающая при этом ЭДС Холла. Следовательно, для индикации мощности можно использовать усилитель постоянного тока при измерении мощности непрерывного излучения и усилитель переменного тока при измерении модулированной или импульсной мощности.

Теоретические исследования гальваномагнитных эффектов в металлах в широком диапазоне частот приведены в работе Н.М.Barlow [19]. Изучая возможность применения эффекта Холла для измерения мощности СВЧ, Н.М.Barlow отметил, что результаты экспериментов на частоте 50 Гц при прочих равных условиях совпадают с результатами экспериментов на частоте 3000 МГц. Совершенствование датчиков Холла и методов измерения позволяет получить более чувствительные ваттметры. Значительное повышение чувствительности ваттметра было достигнуто при применении датчиков Холла из $n - InSb$, имеющего удельное сопротивление $5 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. Датчик размером $(5 \times 4 \times 0,1)$ мм³, установленный в волноводе 3 см-диапазона обеспечивал чувствительность $0,1 \frac{B}{Bm}$, датчик $(9 \times 3 \times 0,1)$ мм³ в резонаторном ваттметре обеспечивал чувствительность 10^{-3} В/Вт. Эти результаты на несколько порядков выше полученных ранее результатов с датчиками из германия. Это не предел возможной чувствительности. Применяя новые полупроводниковые материалы с большой подвижностью, и охлаждая их в жидком азоте, можно повысить чувствительность на несколько порядков.

3.2 Решение уравнения движения носителей зарядов для гармонических полей.

Как было замечено ранее, при исследовании гальваномагнитных эффектов в полупроводниках высказывается предположение, что основную роль при этом, особенно в области СВЧ, играет время релаксации τ носителей зарядов. Для выяснения влияния частоты на чувствительность датчиков Холла необходимо решить уравнение движения носителей зарядов в полупроводнике при переменных гармонических полях. Рассмотрим явление

возникновения поля Холла на частоте ω в изотропном полупроводнике с диэлектрической проницаемостью ε , содержащем n свободных носителей зарядов e на единицу объема с эффективной массой m^* и временем релаксации τ . Для решения воспользуемся основным уравнением движения носителей зарядов в полупроводнике в присутствии электромагнитного поля, решив его для случая гармонически изменяющихся полей.

$$m^* \frac{d\vec{V}}{dt} + \frac{m^*}{\tau} \cdot \vec{V} = e \cdot (\vec{E} + [\vec{V} \times \vec{B}]) \quad (3.1)$$

где \vec{V} - скорость движения носителей.

Рассмотрим решение этого уравнения для случая переменных электрического и магнитного полей с частотой ω . Эти поля являются составляющими одной и той же плоской электромагнитной волны, проходящей через полупроводник. Изменим обозначения. В частности, обозначим через μ_0 магнитную постоянную, через μ обозначим магнитную проницаемость и через u обозначим подвижность носителей заряда. Заменяя в выражении скорость плотностью тока $\vec{j} = en\vec{V}$, получим

$$\frac{d\vec{j}}{dt} + \frac{\vec{j}}{\tau} = \frac{ne^2}{m^*} \left[\vec{E} + \frac{1}{ne} [\vec{j} \times \vec{B}] \right]. \quad (3.2)$$

В правосторонней системе координат

$$\vec{j} \times \vec{B} = \vec{e}_z (j_y B_x - j_x B_y) + \vec{e}_y (j_x B_z - j_z B_x) + \vec{e}_x (j_z B_y - j_y B_z)$$

где $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ - единичные векторы.

При этом уравнение (3.2) распадается на 3 уравнения по координатным осям:

$$\begin{aligned} \frac{dj_z}{dt} + \frac{j_z}{\tau} &= \frac{ne^2}{m} \left[E_z + \frac{1}{ne} (j_y B_x - j_x B_y) \right] \\ \frac{dj_y}{dt} + \frac{j_y}{\tau} &= \frac{ne^2}{m} \left[E_y + \frac{1}{ne} (j_x B_z - j_z B_x) \right] \\ \frac{dj_x}{dt} + \frac{j_x}{\tau} &= \frac{ne^2}{m} \left[E_x + \frac{1}{ne} (j_z B_y - j_y B_z) \right] \end{aligned} \quad (3.3)$$

Считаем теперь, что \vec{E} и \vec{B} являются составляющими одной и той же плоско поляризованной электромагнитной волны, проходящей через объём полупроводника, как показано на рис. 3.4.

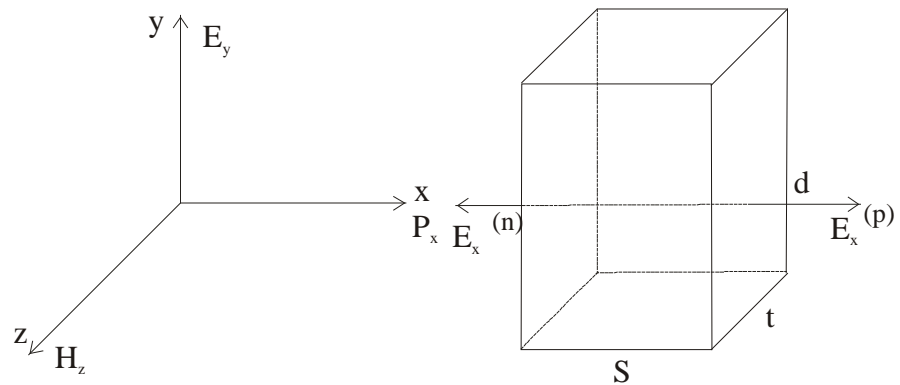


Рис3.4

Следовательно,

$$E_y = E_{0y} \cdot \exp(i\omega t),$$

$$B_z = B_{0z} \cdot \exp(i\omega t),$$

$$E_x = E_H,$$

$$E_z = 0,$$

$$B_y = B_x = 0,$$

(3.4)

где E_{0y}, B_{0z} -- амплитудное значение соответствующих величин;

E_H -- напряжённость Холла.

При выводе выражения для эффекта Холла считаем, что $j_x = 0$, тогда

$$0 = E_H - \frac{j_y B_z}{ne},$$

$$\frac{dj_z}{dt} + \frac{j_z}{\tau} = 0,$$

$$\frac{dj_y}{dt} + \frac{j_y}{\tau} = \frac{ne^2 E_y}{m}.$$

(3.5)

Решим уравнение (3.5) для гармонического поля, пренебрегая релаксационными явлениями, т.е. рассматривая решение для установившегося режима (t много больше τ), получим

$$j_y = \frac{ne^2\tau}{m} \cdot \frac{E_y}{1+i\omega\tau} = \frac{\sigma_0 E_y}{1+i\omega\tau}, \quad (3.6)$$

где $\sigma_0 = \frac{ne^2\tau}{m}$ - проводимость образца на постоянном токе.

Таким образом, из выражения (3.6) следует, что на повышенных частотах электронная (или дырочная) проводимость полупроводника имеет комплексный характер:

$$G = \sigma + ib. \quad (3.7)$$

Как активная, так и реактивная составляющие проводимости в этом случае определяются параметром $\omega\tau$ (который называется параметром инерционности). Выражение для активной и реактивной составляющих имеют вид:

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{1+(\omega\tau)^2}; \quad b = -\omega\tau \frac{\sigma_0}{1+(\omega\tau)^2} \quad (3.8)$$

Основной особенностью активной составляющей проводимости является уменьшение её с ростом частоты. Характерным свойством реактивной составляющей является её индуктивный характер в отличие от емкостной проводимости, обусловленной током смещения. Кажущееся уменьшение диэлектрической проницаемости полупроводника с ростом частоты рассматривается в ряде работ.

Из выражения (3.5) находим выражение для напряженности поля Холла

$$E_H = \frac{j_y B_z}{ne}, \quad (3.9)$$

а также для усредненного значения напряженности поля Холла, которое является мерой проходящей мощности.

$$\bar{E}_H = \frac{1}{2} \cdot \frac{j_{0y} B_{0z} \cos \varphi}{ne}, \quad (3.10)$$

где φ - фазовый угол между током j_y и индукцией B_z , возникающий вследствие комплексного характера электронного тока полупроводника на высокой частоте.

Из выражения (3.8) определим модуль и фазовый угол тока:

$$j_{0y} = \frac{ne^2\tau}{m} \cdot \frac{E_{0y}}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}}, \quad (3.11)$$

$$\varphi = \arctg(-\omega\tau),$$

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}}.$$

Отсюда

$$\langle E_H \rangle = \frac{u}{2} \cdot \frac{\mu_0 \mu E_{0y} H_{0z}}{1+(\omega\tau)^2}, \quad (3.12)$$

где $\frac{e\tau}{m} = u$ - подвижность носителей заряда.

Окончательное выражение для усредненного значения напряженности поля Холла с учетом влияния частоты поля на механизм электропроводности и эффекта Холла в полупроводниках получим в виде:

$$\langle E_H \rangle = \frac{\mu_0 \mu \cdot P_{cp}}{1+(\omega\tau)^2} \quad (3.13)$$

где $P_{cp} = \frac{E_{0y} H_{0z}}{2}$ -- среднее значение плотности потока мощности.

По этому выражению можно оценить, как изменяется чувствительность при изменении частоты вследствие соизмеримости частоты поля ω и частоты соударений $\omega_0 = \frac{2\pi}{\tau}$. На $f = 10000$ МГц величина $(\omega\tau)^2 = 0,0067$, поэтому уменьшение чувствительности на этой частоте должно быть очень незначительным (менее 1%). При $\omega\tau = 1$ ток смещения становится равным току проводимости. Как следует из выражения (3.13) чувствительность при этом падает в 2 раза. Известно также, что эта частота является граничной для таких устройств из Ge, как гираторы.

3.3 Ток смещения и поверхностный эффект.

Отношение тока смещения к току проводимости определяется следующим выражением

$$\frac{j_{см}}{j_{пр}} = \frac{\partial D / \partial t}{\sigma E} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \omega}{\sigma}, \quad (3.14)$$

где D - вектор электрического смещения;

ε - диэлектрическая проницаемость полупроводника;

ε_0 - электрическая постоянная.

Для Ge $\varepsilon = 16$, а σ изменяется в довольно широких пределах в зависимости от концентрации и подвижности основных и примесных носителей заряда.

Для примера, приняв $\sigma = 10^{-2} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, получим

$$\frac{i_{см}}{i_{пр}} = 0,89 \cdot 10^{-11} f \quad (3.15)$$

Отсюда следует, что проводимость $\sigma = 0,01 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ настолько велика, что токами смещения можно пренебречь вплоть до $f = 10^{10} \text{ Гц}$.

Таким образом, на СВЧ следует применять полупроводники с повышенной проводимостью, хотя это и приводит к увеличению собственного потребления мощности датчиком.

На СВЧ электромагнитное поле проникает лишь в тонкий поверхностный слой полупроводникового образца. Это явление известно под названием поверхностного эффекта (скин-эффекта) и оценивается так называемой глубиной проникновения. Это глубина, на которой поле уменьшается до $1/e$ доли своей величины на поверхности (здесь e -- основание натуральных логарифмов). Выражение для эквивалентной глубины проникновения δ определяется путем решения уравнения Максвелла для полупроводника при условии, что токи смещения на данной частоте пренебрежимо малы по сравнению с токами проводимости. Поэтому можно воспользоваться выражением, определяющим эквивалентную глубину проникновения δ для плоских образцов с целью оценки величины этого параметра для указанного образца Ge на $f = 10^{10} \text{ Гц}$.

$$\delta = \frac{2}{\sqrt{\omega\sigma\mu_0\mu}}. \quad (3.16)$$

Для Ge $\mu = 1$, отсюда $\delta = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$. Для увеличения глубины проникновения необходимо применять полупроводники с меньшей проводимостью, а чтобы при данной величине удельной проводимости σ полупроводникового образца не появлялось заметной частотной зависимости до частоты 10^{10} Гц, обусловленной поверхностным эффектом, датчики Холла должны представлять собой пластинку толщиной менее $5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$.

3.4 Особенности использования эффекта Холла в диапазоне СВЧ.

К особенностям применения эффекта Холла в полупроводниках на СВЧ следует отнести дифракцию электромагнитных волн на датчиках ЭДС Холла, скин-эффект и процессы релаксации носителей заряда. Вопросы дифракции электромагнитных волн на датчиках Холла мало исследованы в литературе; лишь в некоторых работах, Н.М.Варлов, S.Kataoka [20], проведено качественное рассмотрение этих процессов и поэтому подробное исследование этого явления будет приведено ниже. В связи с этим в этом параграфе целесообразно рассмотреть лишь вопросы скин-эффекта и релаксации носителей заряда.

Под скин-эффектом обычно понимают сосредоточение почти всего тока высокой частоты, протекающего по проводнику, в очень тонком поверхностном слое. Этот эффект впервые наблюдался Релеем в 1886 г.

Остановимся на рассмотрении вопроса о влиянии скин-эффекта на характеристики датчиков ЭДС Холла. Как будет отмечено ниже, одним из параметров датчика на постоянном токе является его толщина. При работе на переменном токе в области высоких и сверхвысоких частот в том случае, если толщина датчика больше удвоенной толщины скин-слоя, эффективная толщина датчика, очевидно, будет равна толщине скин-слоя. Кроме того, датчик Холла будет эквивалентен системе из двух датчиков, расположенных

параллельно друг другу и включенных параллельно (две боковые поверхности датчика). Кроме того, скин-эффект в датчиках Холла необходимо учитывать при расчете температурного режима датчиков, так как мощность, рассеиваемая датчиком Холла, выделяется лишь в объеме скин-слоя и при работе в импульсном режиме объем скин-слоя датчика Холла может перегреваться, если отвод тепла от него в окружающую среду и внутрь датчика будет недостаточен.

Рассмотрим теперь вопрос о времени релаксации носителей заряда в датчике Холла, или, что то же самое, об инерционности датчиков Холла, так как время релаксации носителей заряда – это время, за которое ток через датчик достигает стабильного значения после выключения внешнего поля. Этот вопрос может быть исследован на основе элементарной теории электронной проводимости металлов, называемой моделью свободных электронов. Если средняя скорость электронов V_d , то уравнение движения электронов имеет вид (здесь мы не учитываем влияние магнитного поля):

$$\frac{m \cdot d\vec{V}_d}{dt} = e\vec{E} - \frac{m\vec{V}_d}{\tau} \quad (3.17)$$

где m – масса электрона;

e – элементарный заряд.

Если концентрация электронов равна n , то плотность тока:

$$\vec{j} = neV_d \quad (3.18)$$

Из этих уравнений можно получить для плотности тока:

$$\frac{d\vec{j}}{dt} = \frac{ne^2\vec{E}}{m} - \frac{\vec{j}}{\tau}. \quad (3.19)$$

Отсюда очень просто выражается время релаксации через параметры среды на постоянном токе:

$$\tau = \frac{\sigma m}{ne^2} = \frac{u \cdot m}{e}, \quad (3.20)$$

где u -- подвижность носителей заряда.

Для синусоидальных полей можно найти следующее выражение для плотности тока:

$$\vec{j} = \frac{\sigma \vec{E}}{1 + i\omega\tau}. \quad (3.21)$$

Рассмотрение более сложных моделей, а также других носителей тока не приводит к изменению вида формулы (3.20). Разница заключается лишь в том, что в ней следует использовать эффективную массу носителей заряда.

3.5 Основные характеристики датчиков Холла в диапазоне СВЧ.

Датчик Холла как чувствительный элемент измерителей мощности и анализаторов структуры электромагнитного поля СВЧ – диапазона обладает следующими характеристиками.

3.5.1 Вольтовая чувствительность

Вольтовая чувствительность датчиков Холла в диапазоне СВЧ определяется выражением:

$$\gamma = \frac{U_H}{P} = \mu_0 \mu \cdot u \cdot b \quad (3.22)$$

где U_H -- среднее значение ЭДС Холла;

P -- среднее значение плотности потока мощности;

u -- подвижность носителей заряда.

Как свидетельствует формула (3.22), вольтовая чувствительность датчиков Холла в диапазоне СВЧ определяется в основном подвижностью носителей заряда в полупроводнике и геометрией датчика. Поэтому при выборе материала необходимо отдавать предпочтение полупроводнику с высокой подвижностью носителей зарядов. Таким материалом является, напри-

мер, антимонид индия (InSb) n – типа, который обладает рекордно высокой подвижностью носителей заряда, в данном случае электронов.

3.5.2 Пороговая чувствительность датчиков Холла

Одной из основных характеристик датчика Холла является пороговая чувствительность, т.е. минимальная мощность, которую датчик Холла может зарегистрировать и которая определяется его шумами.

$$P_0 = \frac{V_u}{\gamma} = \frac{\sqrt{4kTR\Delta f}}{\mu_0 \mu \cdot u \cdot b} \quad (3.23)$$

Обычно в качестве индикатора ЭДС Холла используется гальванометр постоянного тока. Для улучшения пороговой чувствительности датчика Холла следует использовать усилитель с синхронным детектором.

Несмотря на низкий коэффициент преобразования, датчики Холла позволяют измерять малые уровни мощности. Это объясняется тем, что благодаря малому внутреннему сопротивлению ($\sim 10\text{м}$) эти датчики имеют низкий уровень шума, т.к. шум в датчиках Холла тепловой, т.е. имеет такую же природу, что и в обычных проволочных сопротивлениях.

$$V_u = \sqrt{4kTR\Delta f}, \quad (3.24)$$

где k - постоянная Больцмана;

R - сопротивление датчика;

Δf - полоса частот, в которой рассматривается уровень шумов.

Снизить сопротивление датчика можно, используя для его изготовления низкоомные материалы (например, InSb, InAs). Что касается полосы частот, пропускаемых индицирующим электронным устройством, то уменьшение её ограничено шириной спектра СВЧ – сигнала.

Для реализации высокой пороговой чувствительности датчика Холла из низкоомного материала необходимо иметь усилитель со спектральной плотностью шумов, приведенной ко входу, не выше спектральной плотности

шумов датчика Холла. Спектральная плотность напряжения шумов датчика Холла, имеющего сопротивление 10 Ом, при 300°К составляет $\sim 10^{-9}$ В/Гц^{1/2}, к сожалению, даже на участке с минимальной плотностью шумов для транзисторов эта величина составляет $\sim 5 \cdot 10^{-8}$ В/Гц^{1/2}.

Для последующего усиления выгодно иметь сигнал на выходе датчиков Холла переменным с частотой, соответствующей минимуму спектральной плотности шумов транзисторного усилителя $f=10$ кГц. Это достигается модуляцией СВЧ потока. Для обеспечения максимальной чувствительности усилителя полезно делать его узкополосным и выбирать рабочую частоту в области минимальных шумов первого каскада. Однако это представляет неудобство при работе с СВЧ – излучением, модулированным различными частотами. Поэтому наш усилитель является достаточно широкополосным ($\Delta f = 20 \text{ Гц} \div 80 \text{ кГц}$). Как следует из приведенного рассмотрения желательно для изготовления датчиков Холла выбирать полупроводник с малым сопротивлением, т.е. с повышенной проводимостью.

С синхронным детектором, имеющим полосу пропускания 1 Гц, уровень входного шума усилителя составляет

$$U_{\phi} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ В} .$$

В усилителе использованы два избирательных каскада с двойными Т- мостами в цепи обратной связи для уменьшения полосы пропускания. Для стабилизации коэффициента усиления служат несколько цепей глубокой отрицательной обратной связи. Чувствительность усилителя при соотношении сигнал/шум=3 оказалась равной 0,02 мкВ, коэффициент усиления $7,5 \cdot 10^6$. Амплитудная характеристика усилителя приведена на рис.3.1

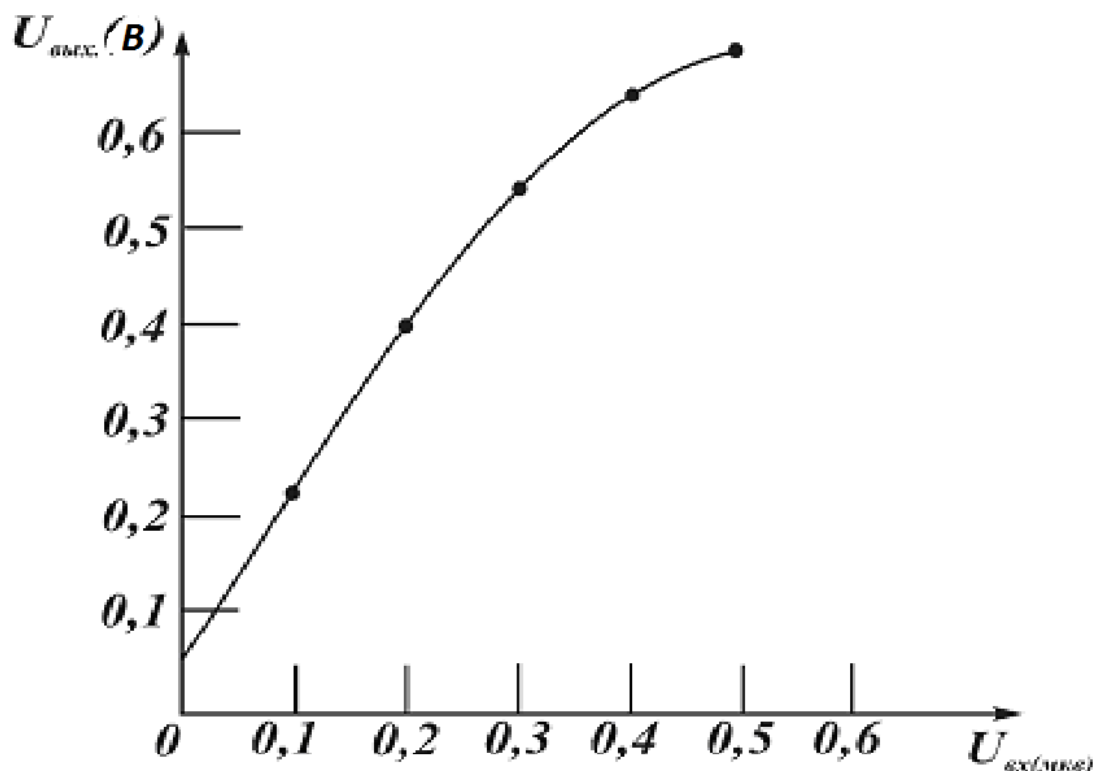


Рис. 3.1

3.5.3. Точечность.

Однозначное соответствие между плотностью потока мощности СВЧ – диапазона и ЭДС Холла с одной стороны, малая толщина и малая величина искажений, вносимых датчиком Холла в исследуемое поле – с другой позволяет судить о точечности датчика Холла. Это означает, что с помощью датчика Холла можно измерить плотность потока мощности СВЧ – диапазона в двух соседних точках, отстоящих на расстояниях, не меньших толщины датчика.

Другими словами, с помощью датчика Холла можно исследовать тонкую структуру или топографию электромагнитного поля СВЧ – диапазона. При использовании датчиков Холла в качестве индикаторов и анализаторов структуры электромагнитного поля СВЧ – диапазона этот параметр (точечность) очень важен, т.к. определяет минимальное расстояние между точками, в которых измеряется плотность потока мощности.

3.5.4 Инерционность.

Инерционность датчика Холла определяется инерционностью электронных явлений, т.е. временем релаксации носителей заряда. Время релаксации носителей заряда определяет максимальную частоту модулированного сигнала, измеряемого датчиком.

Движение электронов и дырок в полупроводниках под действием электрического поля складывается из участков свободного пробега (когда носители тока ускоряются электрическим полем E), прерываемого внезапными столкновениями с решеткой, в результате чего происходит взаимный обмен энергией и импульсом.

Такой процесс чередующихся друг за другом ускорений и соударений приводит к тому, что носитель тока в дополнение к хаотической тепловой скорости приобретает также и некоторую среднюю направленную скорость:

$$\vec{V}_d = u\vec{E}.$$

Каждому носителю тока можно приписать некоторую среднюю длину свободного пробега l и среднее время между двумя последовательными соударениями τ_0 (время свободного пробега); эти величины, вообще говоря, зависят от энергии носителя тока. Время τ_0 можно также рассматривать как время релаксации предоставленной самой себе неравновесной электронной системы, в течение которого возмущение равновесного распределения уменьшается в e раз.

Некоторые авторы [21] считают, что устройства на основе эффекта Холла имеют верхний частотный предел, который определяется временем диэлектрической релаксации, которое имеет порядок 10^{-15} с. Таким образом, на использованных нами частотах 10^{11} -- 10^{12} Гц эффект Холла практически является безинерционным.

3.5.5 Линейная зависимость ЭДС Холла от величины плотности потока мощности СВЧ.

Под линейностью датчиков Холла в диапазоне СВЧ понимается линейность его по отношению к падающей на него мощности. Линейность может нарушаться из-за нагревания датчика при очень больших уровнях мощности.

Считается, что применение для изготовления датчиков Холла полупроводников с повышенной проводимостью приводит к увеличению собственного потребления мощности. Авторы данного отчета не согласны с этим мнением. Так как датчик Холла является индикатором проходящего типа, то большая часть энергии электромагнитной волны, распространяющейся по волноводу или в свободном пространстве, проходит мимо датчика. Только небольшая ее часть, приходящаяся на его сечение, поглощается им. Конечно, эффективность преобразования в этом случае невелика. Однако применяя соответствующие полупроводниковые материалы или охлаждение датчиков Холла до температуры жидкого азота, а также высокочувствительные микровольтметры или усилители постоянного тока, можно значительно повысить чувствительность индикаторов плотности потока мощности и анализаторов структуры электромагнитного поля СВЧ – диапазона, основанных на эффекте Холла.

Как мы уже рассматривали в выше, в СВЧ – диапазоне электромагнитное поле проникает лишь в тонкий поверхностный слой проводящего образца. Это явление известно под названием поверхностного эффекта и оценивается так называемой глубиной проникновения δ , которая определяется из выражения (3.16):

$$\delta = \frac{2}{\sqrt{\omega \sigma \mu_0 \mu}}.$$

Формула верна при условии, что токи смещения на данной частоте пренебрежимо малы по сравнению с токами проводимости.

Толщина датчика Холла должна быть меньше δ . Значение δ для выбранного материала даны в таблице 3.1. Отношение тока смещения к току проводимости определяется выражением (3.14):

$$\frac{j_{см}}{j_{пр}} = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon \cdot f}{\sigma}$$

Если $\frac{j_{см}}{j_{пр}}$ много меньше единицы, то токами смещения можно пренебречь, так как основной вклад в создание ЭДС Холла вносят токи проводимости [21].

Таблица 3.1

Материал датчика	$N_{\min} \text{М}^{-3}$	$l/\text{Ом.м}$	$u_n, \text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$\delta(\text{м})$ $f=5,5 \cdot 10^9$ Гц	$i_{см}/i_{\text{пров}}$ $f=5,5 \cdot 10^9$ Гц	$\delta(\text{м})$ $f=10^{10}$ Гц	$i_{см}/i_{\text{пров}}$ $f=10^{10}$ Гц	$\gamma_{\text{экс}}$ $\text{В}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}$
Ge	$1,3 \cdot 10^{21}$	100	0,36	$6,8 \cdot 10^{-4}$	$4,9 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-9}$
GaAs	$9 \cdot 10^{22}$	$3,2 \cdot 10^3$	0,25	$3 \cdot 10^{-4}$	$1,53 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-10}$
InAs	$3,2 \cdot 10^{22}$	$4,3 \cdot 10^3$	2,35	$6,2 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$5,4 \cdot 10^{-4}$	$6,2 \cdot 10^{-9}$
InSb	$2,8 \cdot 10^{23}$	$8,5 \cdot 10^3$	4,6	$5 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$	$5,1 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$

Таким образом, на СВЧ желательно применять полупроводники с повышенной проводимостью. Проведенные вычисления отношения тока смещения к току проводимости (таблица 3. 1) для разных полупроводниковых материалов (Ge, InSb, InAs) с заданными параметрами показывают, что токами смещения можно пренебречь на частотах 5500 МГц и 10000 МГц.

3.5.6 Частотная зависимость чувствительности.

Поскольку верхняя частотная граница эффекта Холла определяется временем диэлектрической релаксации, т.е. временем между двумя последовательными соударениями носителя заряда с решеткой, которая для указанных материалов имеет порядок величины ($\approx 10^{-13} \div 10^{-15}$) секунды, то с этой точки зрения частотная зависимость чувствительности в используемом нами

диапазоне частот не должна проявиться. Экспериментально это будет показано в следующем разделе.

3.5.7 Зависимость ЭДС Холла от угла между плоскостью датчика и плоскостью поляризации волны.

При взаимодействии электромагнитной волны типа H_{10} с двухэлектродным датчиком Холла (рис.3.2), электрическая составляющая E_y вызывает движение носителей заряда в нем. А под действием магнитной составляющей поля H_x , движущиеся заряды отклоняются к боковым граням датчика. Вследствие этого ЭДС Холла U_H , которую можно представить в виде:

$$U_H = kE_y H_x = kP_z, \quad (3.25)$$

где k – коэффициент пропорциональности, зависящий от физических свойств материала и геометрии датчика;

P_z - плотность потока мощности СВЧ.

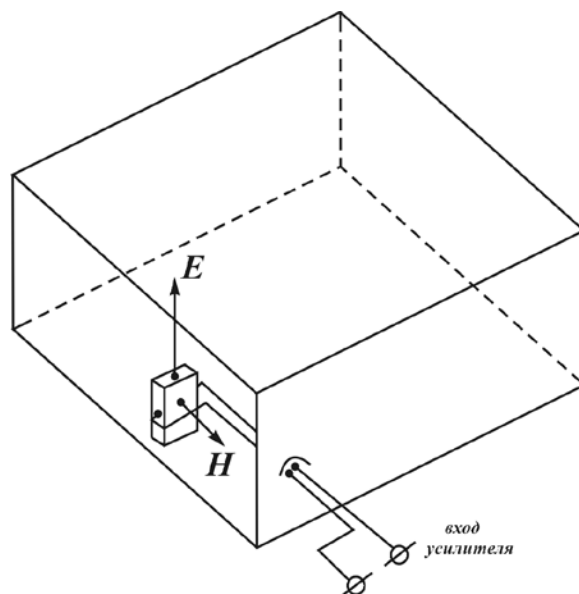


Рис. 3.2

В этом случае двухэлектродный датчик Холла как элемент цепи оказывается разомкнутым по постоянному току (отсутствуют токовые электроды), однако электрическая цепь замыкается по высокой частоте в воздухе токами смещения.

Из формулы (3.25) следует, что между плотностью потока P_z мощности электромагнитного поля СВЧ – диапазона в данной точке и ЭДС Холла U_H на гранях полупроводникового датчика, помещенного в эту точку, существует однозначное соответствие. Следовательно, возникающая ЭДС Холла может служить мерой проходящей мощности.

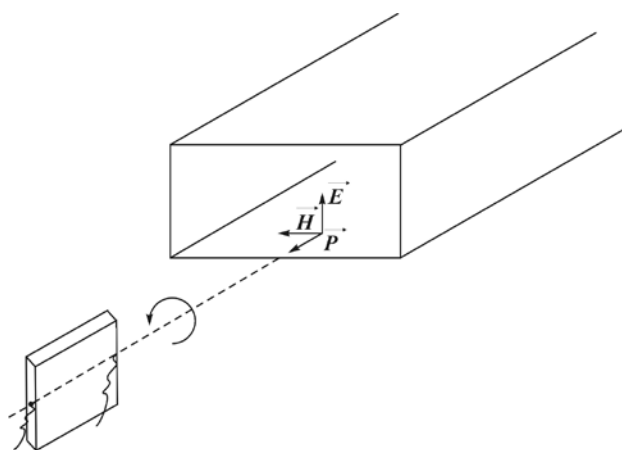


Рис. 3.3

Так как при распространении электромагнитной волны в свободном пространстве ортогональность компонент сохраняется, а фазовый угол между составляющими электромагнитной волны равен нулю, то можно записать соотношение между ЭДС Холла и плотностью потока мощности в свободном пространстве (рис.3.3):

$$U_H = kP_z \cos^2 \varphi \quad (3.26)$$

где φ - угол между плоскостью датчика и плоскостью поляризации волны.

И в этом случае, ЭДС Холла оказывается пропорциональной плотности потока мощности электромагнитного поля СВЧ диапазона в свободном пространстве.

Таким образом, вращая датчик Холла относительно оси, совпадающей с направлением распространения электромагнитной волны, т.е. изменяя угол между плоскостью датчика и плоскостью поляризации волны, можно определить поляризацию падающей электромагнитной волны.

3.6. Некоторые вопросы методики измерения эффекта Холла на СВЧ.

Отметим основные проблемы методики измерения эффекта Холла в диапазоне СВЧ. К ним относятся создание установки для исследования эффекта Холла в полупроводниках, в частности, исследование чувствительности датчиков ЭДС Холла, выполненных из различных полупроводниковых материалов и с помощью различных технологий, частотной зависимости чувствительности, степени возмущения датчиком исследуемого электромагнитного поля, процессов старения датчиков и т. д.

Установка состоит из генераторов СВЧ колебаний ГЗ – 34 (частота 12400 – 16500) МГц и Г4 – 10 а (частота 3700 – 7400) МГц, систем канализации электромагнитного излучения, измерительных волноводных секций с датчиками Холла, согласованных нагрузок, излучателей электромагнитных волн, датчиков Холла в свободном пространстве и измерительной аппаратуры, включающей усилитель низкой частоты с индикатором напряжения и осциллографа С1 – 8А.

Поскольку предварительные исследования показали, что датчики Холла обеспечивают более высокую точность измерения проходящей мощности СВЧ излучения, чем существующие промышленные образцы измерителей мощности, для контроля проходящей мощности использовались измерительные волноводные секции с датчиками Холла, предварительно откалиброванные по промышленному измерителю мощности. Это связано с за-

метным нарушением баланса моста в течение времени измерения. Во всех применениях датчиков Холла в диапазоне СВЧ нами использовались двухэлектродные датчики.

Двухэлектродный датчик Холла, как элемент цепи, представляет собой полупроводниковый прибор, состоящий из прямоугольной пластинки полупроводника с омическими контактами холловских выводов, которые симметрично располагаются на боковых рёбрах пластины.

Двухэлектродные датчики Холла могут быть как кристаллическими с подложкой и без неё, так и плёночными. В качестве подложки используется электроизоляционный материал с диэлектрической проницаемостью близкой к единице.

Размеры датчиков обычно выбираются так, чтобы его ширина была в 2 – 3 раза меньше длины, а толщина $\sim (0,1 - 0,15)10^{-3}$ м для кристаллического и $(1 - 10)10^{-6}$ м для плёночного.

Холловские электроды выполняются точечными; размеры контактов должны обеспечить электрическую и механическую прочность, но быть по возможности наименьшими, т.к. размеры контактной поверхности (ширина и глубина электрода) влияют на чувствительность датчика.

Для использования датчиков Холла в различных диапазонах длин волн его помещали в держатель соответствующего размера из мелкопористого пенополистирола. Размеры держателя были рассчитаны на сечение 8 миллиметрового, а также 2, 3, и 4 сантиметрового волноводов (рис. 3.4).

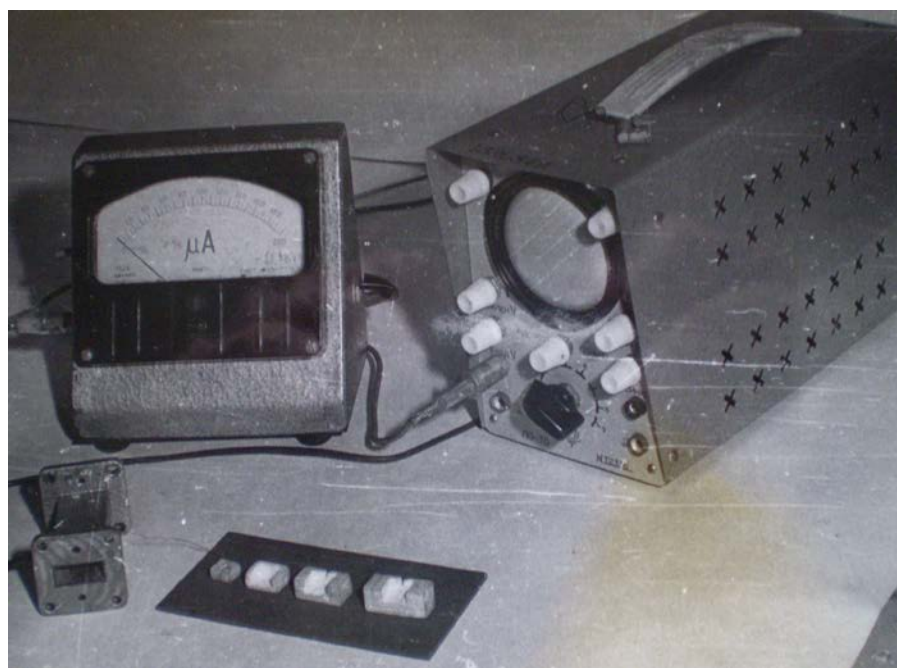


Рис. 3.4

При разработке индикаторов мощности СВЧ, использующих эффект Холла в полупроводниках, особое внимание уделяется увеличению чувствительности устройства и уменьшению потребляемой мощности.

Одной из основных характеристик индикатора мощности на эффекте Холла является его пороговая чувствительность (3.23). Пороговая чувствительность применяемого индикатора мощности равна $8 \cdot 10^{-6}$ Вт. Несмотря на относительно низкий коэффициент преобразования, датчик Холла позволяет измерять довольно малые уровни мощности. Это объясняется тем, что из-за малой величины внутреннего сопротивления (~ 1 Ом) датчик Холла имеет очень низкий уровень шумов (3.24). Очевидно, что для реализации высокой пороговой чувствительности и снижения уровня шумов датчика Холла необходимо снижать его сопротивление и по возможности ограничивать полосу частот электронных устройств, используемых для индикации выходного напряжения с датчика Холла.

Снизить сопротивление датчика можно, используя для его изготовления низкоомные материалы (например, InSb и InAs). Что касается полосы

частот, пропускаемых индицирующим электронным устройством, то уменьшение её ограничено шириной спектра исследуемого СВЧ – сигнала.

Для разработки измерителя плотности потока мощности СВЧ, использующего датчик Холла, необходимо было разработать электронный усилитель, на выход которого можно было бы включить стрелочный индикатор. Так как на выходе усилителя включается стрелочный прибор с инерционностью ~ 1 сек, то полоса пропускания усилителя может составлять величину ~ 1 Гц. При меньшей ширине полосы пропускания увеличивается инерционность измерителя, при большей ширине снижается его чувствительность.

Известно, что усилители постоянного тока имеют во много раз меньшую чувствительность, чем усилители переменных сигналов. Поэтому сигнал на выходе датчика Холла должен быть переменным, а для этого необходима модуляция по амплитуде потока СВЧ. Частота модуляции выбирается исходя из минимума спектральной плотности шумов транзисторного усилителя (~ 10 кГц).

Создание усилителя с шириной полосы пропускания порядка 1 Гц при средней частоте ~ 10 кГц и выше с помощью обычных фильтров практически невозможно. Поэтому в данной работе использован синхронный детектор, полоса пропускания которого легко может быть сделана ~ 1 Гц и меньше. Уровень входных шумов усилителя с полосой пропускания ~ 1 Гц составляет величину

$$V_{ш} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ В} = 0.005 \text{ мкВ.}$$

В таблице 3.2 приведены минимальные плотности потока мощности СВЧ, измеряемые датчиками Холла из InSb и InAs, прибором Ф-116/1 и с помощью усилителя.

Таблица 3.2

Материал датчика	$n_i, \text{м}^{-3}$	$u_n, \text{м}^2/\text{В} \cdot \text{сек}$	I, А	P_{\min} Вт/м ² (Ф116/1)	P_{\min} Вт/м ² (Усилитель)
InSb	$1,4 \cdot 10^{20}$	5	---	$4 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$
InAs	$3,2 \cdot 10^{22}$	2,35	---	1,3	$6,5 \cdot 10^{-3}$

3.7 Карманный дозиметр СВЧ излучения.

Широкое применение средств радиоэлектроники, в частности, работающих в диапазоне СВЧ, приводит к необходимости разработки мер, обеспечивающих безопасность обслуживающего персонала. Доказано вредное воздействие СВЧ излучения на организм человека, если интенсивность излучения превосходит определённые уровни.

В результате экспериментальных исследований характера биологического действия СВЧ излучения установлена предельно допустимая величина интенсивности излучения – $0,1 \text{ Вт} / \text{м}^2$. Чтобы надёжно предупредить воздействие на людей излучения с большей интенсивностью, необходимы дозиметры СВЧ излучения.

Остановимся на основных требованиях, предъявляемых к параметрам дозиметра СВЧ.

1. Рабочий диапазон длин волн (ГГц). Участков спектра, свободных от возможного облучения человека мощными полями, фактически нет. Некоторое исключение составляет участок СВЧ диапазона выше 3 ГГц, где самолётные и судовые радиолокаторы занимают сравнительно узкий диапазон.

2. Чувствительность ($\text{Вт} / \text{м}^2$) аппаратуры полностью определяется нормированными уровнями (в США – $1 \text{ Вт} / \text{м}^2$) и более, в СССР минимальный уровень, подлежащий измерению, составлял $0,1 \text{ Вт} / \text{м}^2$, с учётом намечаемой тенденции нормативов для населения – $0,01 \text{ Вт} / \text{м}^2$.

3. Динамический диапазон (ДД). Термин динамический диапазон (ДД) аппаратуры включает в себя три различных понятия: шкальный диапазон интенсивностей, укладываемый на шкале регистратора; разовый ДД – диапазон интенсивностей, которые могут быть измерены без сложной перестановки элементов аппаратуры, например, внешних аттенюаторов, антенн др.; общий ДД – диапазон интенсивностей, которые вообще могут быть измерены данным измерителем.

Общий ДД определяет пригодность аппаратуры для заданных целей. Например, для контрольных целей вполне достаточно обеспечить диапазон $(20 \dots 25) \text{ дБ}$, $(0,05; 20) \text{ Вт} / \text{м}^2$.

4. Точность измерения интенсивности (дБ). Высшая точность измерений интенсивности в свободном пространстве достигается за счёт высокой сложности и стоимости аппаратуры, требованием создания особых условий и очень малой производительностью. Точность измерения интенсивности $\pm 3 \text{ дБ}$ при всех видах измерительных работ, связанных с защитой человека, можно считать вполне достаточной. В зоне действия одной или нескольких радиоэлектронных систем интенсивность поля в различных точках обследуемого участка изменяется по столь сложному закону, что её можно рассматривать как случайную функцию координат обследуемого участка. Поэтому одиночное измерение, произведённое в той или иной точке участка, мало о чём говорит. Для характеристики интенсивности поля на участке должны быть произведены измерения в возможно большем количестве точек участка, и в качестве действительного значения интенсивности на данном участке должно быть принято среднее значение. Необходимое количество измере-

ний может быть получено только с помощью высокоскоростной (автоматизированной) аппаратуры.

5. Быстродействие (число измерений в час). Быстродействие полностью определяет возможность проведения большого количества измерений, оно находится в прямой зависимости от функционального и конструктивного решения. Применение непосредственно показывающей системы регистрации, неполяризованный приём в широком телесном угле позволяют до минимума сократить время измерения. Степень эксплуатационных удобств, необходимость тщательной пространственной и поляризационной ориентации антенны также в значительной степени влияют на быстродействие аппаратуры.

6. Инерционность. Инерционность является внутренним параметром измерительной аппаратуры, но, тем не менее, она является одним из основных параметров, определяющих быстродействие аппаратуры при измерении полей станций с перемещающимися диаграммами направленности. Инерционность – это минимальное время действия сигнала, которое обеспечивает регистрацию результата с заданной точностью. Инерционность лучших болометров и термопар оцениваются величиной $10^{-2} - 10^{-3}$ с. Поэтому инерционность аппаратуры, использующей эти элементы, в принципе не может быть меньше этой величины.

7. Минимальное расстояние до точечного излучателя (м).

Минимальное расстояние зонда от металлического предмета ограничивает возможность использования данного типа измерителей. Основным элементом схемы, определяющим способность работы вблизи предметов, отражающих радиоволны, является антенна – зонд. Введение зонда в исследуемое поле вызывает эффекты трёх видов: искажение первичного поля; пространственное усреднение поля по приёмной поверхности; появление погрешности оценки биологической эффективности поля на основании данных измерений из-за несоответствия электромагнитной структуры поля и

того поля, для которого она рассчитана. Разработка малогабаритных зондов с эффективной поглощающей подложкой позволила в некоторой степени снизить влияние перечисленных эффектов, но до идеального решения, очевидно, ещё далеко.

Авторами разработан карманный дозиметр СВЧ на основе датчика Холла, позволяющий информировать человека, если интенсивность СВЧ излучения становится больше допустимой. Основным преимуществом данной разработки является совмещение в датчике Холла трёх узлов традиционной схемы: антенны, системы канализации СВЧ и детектора, за счёт чего достигается компактность устройства.

Как известно из описанного выше, на выводах Холла появляется низкочастотное или постоянное напряжение, пропорциональное произведению амплитуд электрического и магнитного компонентов электромагнитной волны, если датчик помещён в поле электромагнитного излучения. Отметим основные преимущества датчиков Холла

1. Линейная связь ЭДС Холла с величиной мощности электромагнитного излучения до весьма больших уровней мощности.
2. Широкий частотный диапазон использования, частотная зависимость чувствительности датчика начинает проявляться лишь тогда, когда длина датчика становится больше, чем половина длины волны.
3. Безинерционность датчиков Холла в диапазоне СВЧ (до 10^{15} с.)
4. Возможность индицирования различных уровней мощности электромагнитного излучения на расстоянии порядка толщины датчика (точность). В плёночных датчиках Холла толщина $\sim 10^{-5}$ м.
5. Возможность повышения чувствительности датчиков Холла охлаждением их до температуры (70...100) К. При этом чувствительность увеличивается на два порядка.
6. Простота измерительной схемы.

7. Малое искажение исследуемого электромагнитного поля. В худшем случае, на границе частотного диапазона 350 ГГц, где длина датчика равна половине длины волны, на расстоянии, равном половине длины волны от центра датчика, рассеиваемое им поле на порядок меньше исследуемого.

8. Малый уровень собственных шумов датчика. Мощность его собственных шумов имеет порядок $10^{-17} - 10^{-19}$ Вт/ Гц.

9. Высокая надёжность датчиков Холла.

Основным недостатком датчика Холла является то, что он реагирует только на проходящую волну и не чувствует стоячих волн, что следует учитывать при использовании дозиметра.

Блок – схема дозиметра СВЧ представлена на рис 3.5,

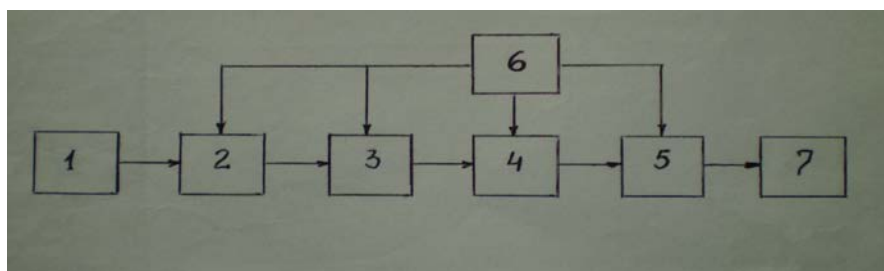


Рис. 3.5

где 1 - блок датчиков Холла, состоящий из трёх датчиков Холла, ориентированных в трёх взаимно перпендикулярных плоскостях, и суммирующий их выходные напряжения независимо от их полярностей; 2, 3 – каскады усилителя постоянного тока; 4 – пороговое устройство; 5 – звуковой генератор; 6 – блок питания; 7 – звуковой сигнализатор.

Основным элементом дозиметра является датчик Холла, индицирующий интенсивность излучения в месте его расположения. Как элемент цепи, датчик Холла представляет собой полупроводниковый прибор, состоящий из пластинки полупроводника с омическими контактами холловских выводов, которые располагаются симметрично на боковых рёбрах (рис.3.6).

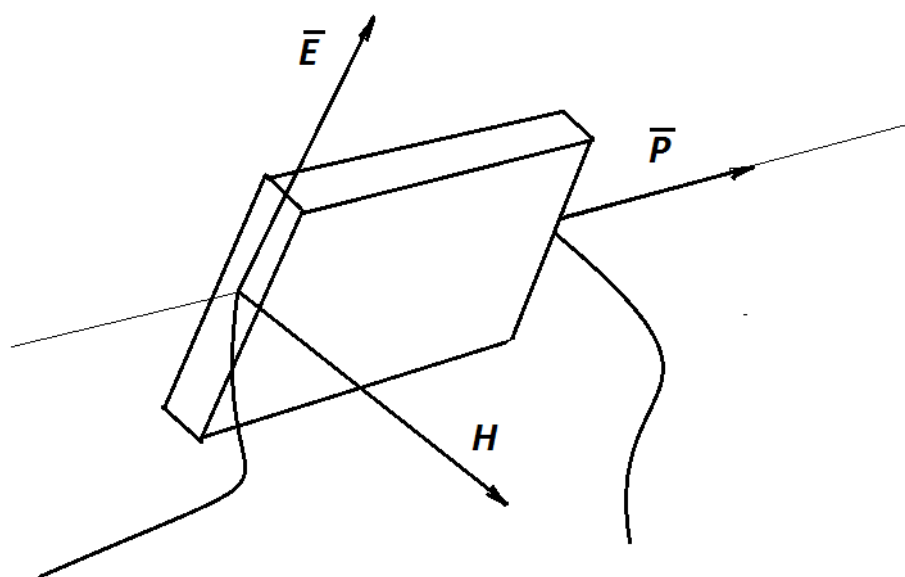


Рис. 3.6

Холловские электроды выполняются точечными, размеры и качество контактов должны обеспечивать электрическую и механическую прочность, но быть по возможности наименьших размеров, т.к. размеры контактных поверхностей влияют на чувствительность датчика. Омические контакты были изготовлены методом лазерной сварки. Датчик Холла был изготовлен из InAs с $n = 3,2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$, $\mu = 2,35 \text{ м}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$, размеры датчика $(2 \times 1 \times 0,15) \text{ мм}$.

Усилитель постоянного тока в миниатюрном исполнении собран на двух микросхемах 140 УД1А и пяти транзисторах, Чувствительность усилителя составляет $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ В}$.

Звуковой генератор собран на микросхеме 155 ЛА7. Звуковой генератор изменяет частоту в зависимости от величины приложенного напряжения. При величине интенсивности СВЧ излучения выше допустимой срабатывает пороговое устройство, включающее звуковой генератор с сигнализатором. С увеличением интенсивности облучения частота звука возрастает.

Испытание лабораторного макета с одним датчиком Холла подтвердили его работоспособность. Лабораторный макет имеет размеры (115×65×32) мм. Порог срабатывания макета может быть установлен в допустимых пределах (0,01; 0,1 Вт/м²).

3.8 Ваттметр на эффекте Холла для контроля больших уровней импульсной проходящей мощности СВЧ.

Измерение больших уровней импульсной проходящей мощности с помощью известных методов встречает значительные затруднения, которые связаны с нарушением структуры поля в передающей линии, недолговечностью и малой надежностью используемых индикаторов. Поэтому представляет интерес исследовать возможность использования двухэлектродного датчика Холла в ваттметре для измерения больших уровней импульсной проходящей мощности СВЧ в волноводном тракте.

Двухэлектродные датчики Холла могут быть как кристаллическими с подложкой и без нее, так и плёночными. В качестве подложки берется электроизоляционный материал с диэлектрической проницаемостью, близкой к единице. Размеры датчиков обычно выбираются так, чтобы ширина была в 2—3 раза меньше длины, а толщина - (0,1--0,15) мм для кристаллического и (1 --10) мкм для плёночного.

Холловские электроды выполняются точечными. Размеры контактов должны обеспечить электрическую и механическую прочность, но быть по возможности наименьшими, так как размеры контактной поверхности (ширина и глубина электрода) влияют на чувствительность датчика. При работе в диапазоне СВЧ двухэлектродные датчики изготовлялись из сурьмянистого индия (InSb) и мышьяковистого индия (InAs). Контакты к датчикам припаиваются чистым индием и припоями на его основе.

Рассчитаем максимально допустимую СВЧ мощность, передаваемую по волноводу с использованием датчика Холла. С этой целью воспользуемся

формулой для допустимой мощности рассеяния датчика Холла на постоянном токе

$$P_{\max} = \frac{2Q\Delta T}{d}, \quad (3.27)$$

где P_{\max} - максимально допустимая мощность рассеяния на единицу объёма;

ΔT - максимально допустимый нагрев датчика;

Q - коэффициент теплоотдачи в воздухе.

Так, например, для $\Delta T = 100^{\circ}\text{C}$, $d = 0,15\text{мм}$, $Q = 40\text{ Вт}\cdot\text{м}^2/\text{град}$, $P_{\max} = 50\text{ Вт}/\text{м}^3$ и датчика размером $(4 \times 2 \times 0,15)\text{ мм}$, максимально допустимая мощность рассеяния на постоянном токе составит $0,06\text{ Вт}$. Для оценки максимально допустимой импульсной мощности СВЧ, передаваемой по волноводу с использованием датчика Холла, расположенного в центре волновода, необходимо учесть : а) распределение поля в волноводе, б) размеры датчика, в) коэффициент преобразования датчика.

Поглощённая датчиком мощность СВЧ излучения P_{Π} определяется по формуле $P_{\Pi} = kP$, где P – мощность СВЧ, передаваемая по волноводному тракту, k - коэффициент преобразования датчика.

Так, например, если площадь поперечного сечения волновода трёхсантиметрового диапазона равна 230 мм^2 , площадь поперечного сечения датчика – $0,6\text{ мм}^2$, датчик расположен в центре волновода, то мощность, поглощённая датчиком, составит

$$P_{\Pi} = 5 \cdot 10^{-3} P.$$

В этом случае, принимая максимально допустимую мощность рассеяния датчика численно равной величине мощности рассеяния на постоянном токе, т.е. $0,06\text{ Вт}$, получим максимально допустимую мощность непрерывных СВЧ колебаний по волноводу

$$P = P_{\Pi} / 5 \cdot 10^{-3} = 6 \cdot 10^{-2} / 5 \cdot 10^{-3} = 12\text{ Вт}.$$

Экспериментальное исследование ваттметра с двухэлектродными датчиками Холла из InSb и InAs размерами $(4 \times 2 \times 0,15)$ мм³ проводилось по блок – схеме рис.3.7, где 1 – генератор СВЧ , 2 – отрезок волновода с двухэлектродным датчиком Холла, 3 – измеритель мощности , 4 – импульсный милливольтметр. В волноводе стандартного сечения 3 – см диапазона возбуждалась волна типа H_{10} ($f = 9370$ МГц). Скважность импульса была равна 1000, КСВН в линии передачи - не больше 1,2.

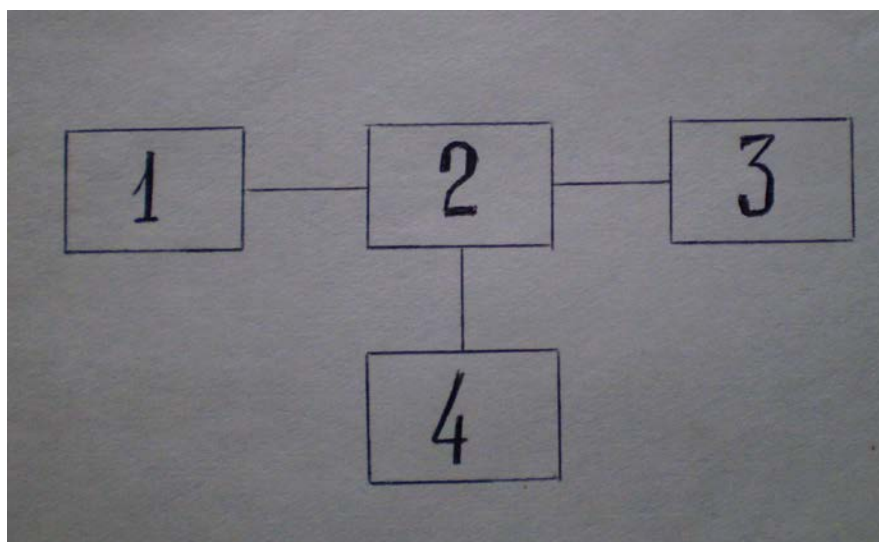


Рис. 3.7

Расположение датчика внутри волновода показано на рис.3.8, где 1,2 –электроды Холла, 3 – датчик Холла , E_y , H_z –электрическая и магнитная составляющие поля волны, P –вектор Умова – Пойнтинга.

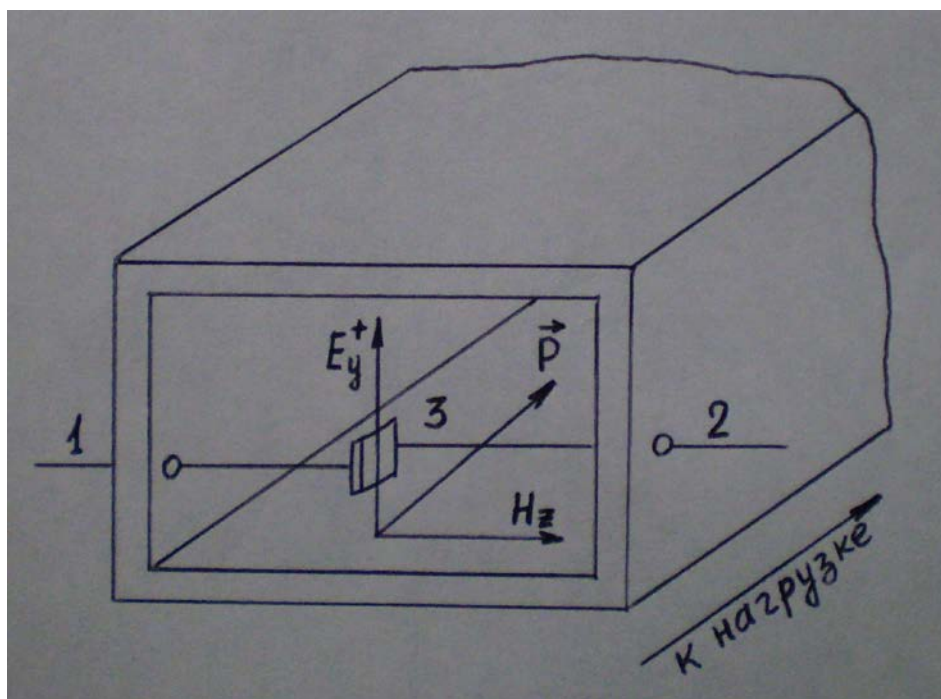


Рис 3.8

В ходе эксперимента измерялась ЭДС Холла в зависимости от величины проходящей мощности.

Если генератор СВЧ работает в импульсном режиме, то ЭДС Холла имеет составляющую, изменяющуюся по закону модуляции. Величина сигнала с двухэлектродного датчика измерялась импульсным милливольтметром типа МВИ – 1А. Одновременно с этим производилось измерение средней мощности калориметрическим ваттметром.

На рис.3.9 представлены экспериментальные кривые зависимости с ЭДС Холла от величины проходящей мощности для ваттметра с датчиком Холла из InSb и InAs .

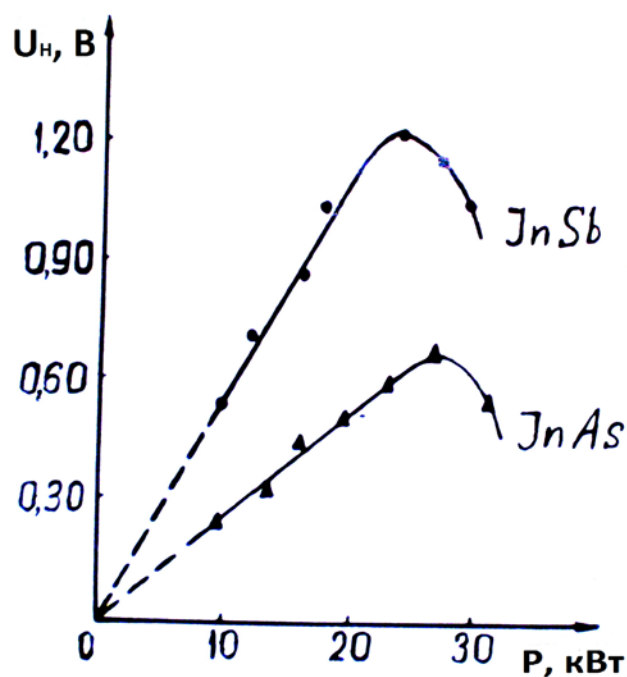


Рис. 3.9

Вольтовая чувствительность, вычисленная из эксперимента для датчиков из InSb, составила $5,5 \cdot 10^{-5} \text{ В/Вт}$, а для датчиков из InAs – $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ В/Вт}$. Как видно из рис.3.15 ЭДС Холла линейно зависит от величины импульсной проходящей мощности вплоть до $20 \cdot 10^3 \text{ Вт}$, что соответствует (в пределах точности эксперимента) теоретически рассчитанной средней мощности 12 Вт.

Очевидно, что верхний предел измерения импульсной проходящей мощности ваттметра на основе двухэлектродного датчика Холла может быть увеличен путём расположения датчика вблизи одной из узких стенок волновода.

3.9 Способы повышения чувствительности датчиков Холла на СВЧ.

3.9.1 Высокочувствительный охлаждаемый датчик Холла из InSb на СВЧ.

В главе 2 была указана принципиальная возможность увеличения чувствительности датчиков ЭДС Холла путём использования сверхчистых

материалов для датчиков и понижения рабочей температуры датчика до 70 – 100 К. Позднее были сообщены экспериментальные результаты для охлаждаемых датчиков Холла, применяемых для измерения постоянных магнитных полей. Поскольку датчики Холла находят всё большее применение для измерения мощности электромагнитного поля СВЧ диапазона, повышение их чувствительности является важной задачей. Повышение чувствительности схемными методами не всегда возможно, поэтому охлаждение их с целью повышения чувствительности представляет определённый интерес.

Для этой цели использовались двухэлектродные датчики Холла из InSb п – типа с концентрацией носителей заряда $1,4 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ и подвижностью электронов, равной (5-6) $\text{м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при 78 К. Пластинки длиной 4 мм, шириной 2мм и толщиной 0,3мм вырезались из монокристаллического сурьмянистого индия, полученного методом Чохральского в физико-техническом институте А.Н. СССР им. А.Ф. Иоффе. Шлифовкой с последующим травлением в СР – 4 толщина пластинки доводилась до 0,1 – 0,15 мм. Холловские контакты припаивались индием миниатюрным паяльником. Затем датчики наклеивались на подложку из мелкопористого пенополистирола, как материала, не вносящего заметных искажений в распределение плотности потока мощности электромагнитного поля СВЧ. Поверхность датчиков покрывалась защитным лаком. Сопротивление датчиков между Холловскими выводами составляло 3 -5 Ом. ЭДС Холла на частоте 10 ГГц на открытом конце волновода стандартного сечения (23×10) мм^2 измерялась микровольтметром Ф-116/1 по блок – схеме представленной на рис.3.10. .

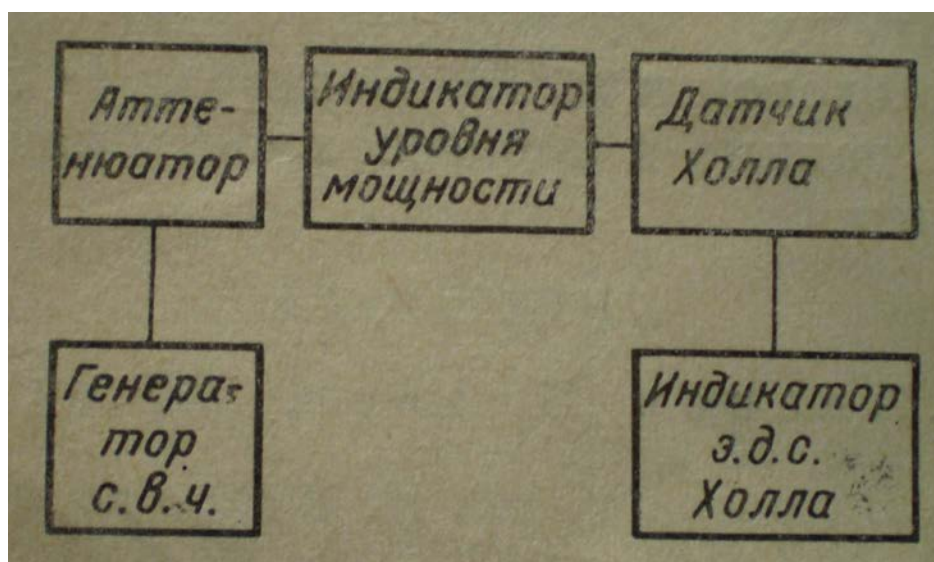


Рис. 3.10

При 78 К датчики Холла показали чувствительность 140 – 160 мкВ/мВт, что не менее чем на два порядка превышает чувствительность датчиков Холла, работающих при комнатной температуре. Как видно из рис. 3.11, линейная зависимость ЭДС Холла от плотности потока мощности СВЧ сохраняется и у охлаждаемых датчиков Холла.

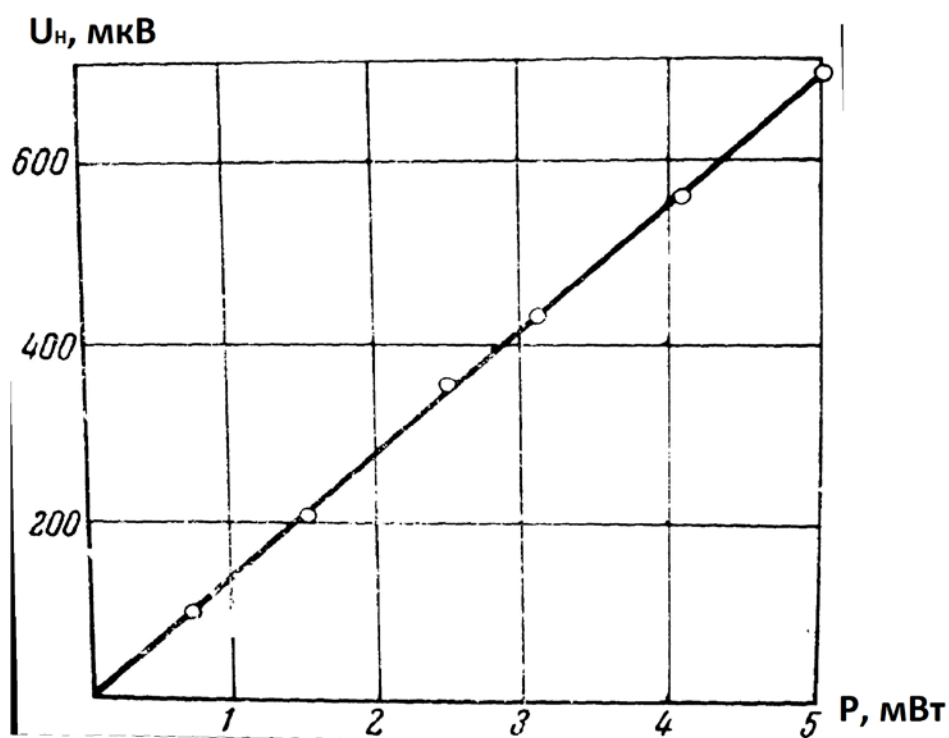


Рис. 3.11

Минимальный регистрировавшийся поток мощности, распространяющийся по волноводному тракту 3 – см диапазона, составляет 10^{-6} Вт. И это ещё не предел минимально возможной обнаруживаемой мощности СВЧ для охлаждаемого датчика Холла. Применяя высокочувствительный усилитель чувствительностью 10^{-8} В, можно регистрировать мощность $10^{-9} - 10^{-10}$ Вт.

3.9.2 Метод гетеродинирования.

Одним из возможных путей повышения чувствительности датчиков Холла является использование режима гетеродинирования. Как и в случае смесителей на кристаллических диодах, принципиальная возможность преобразования частоты на датчике Холла заложена в пропорциональности величины сигнала ЭДС Холла, с одной стороны, и падающей мощности, с другой.

В основе принципа преобразования лежит известное положение: энергия суммы двух гармонических колебаний не аддитивна, т.е. не равна сумме энергий каждого колебания.

Суммарная мощность двух гармонических сигналов состоит из двух частей. Одна часть является постоянной во времени и равной сумме мощностей сигнала и гетеродина. Другая часть является переменной, изменяющейся во времени с разностной частотой Ω и с амплитудой $2\sqrt{P_s \cdot P_c}$. Тогда, наряду с индикацией суммарной мощности сигнала и гетеродина, датчик Холла будет реагировать и на интерференционный член спектра суммы этих двух синусоидальных сигналов.

Так как датчик Холла является практически безинерционным устройством то для получения промежуточной частоты $\omega_r - \omega_c = \Omega$ можно использовать одногенераторную и двухгенераторную схемы. При этом промежуточную частоту можно выбирать в зависимости от частоты настройки используемого усилителя.

Использование датчика Холла в одnogенераторном гетеродинном приёмнике позволяет повысить чувствительность датчика в волноводном тракте по сравнению с детекторным режимом примерно на три порядка при $P_r=10^{-3}$ вт; применение двухгенераторной схемы позволяет повысить чувствительность на четыре порядка при $P_r=1$ вт.

3.10 Измеритель модулированной плотности потока мощности СВЧ.

Одной из основных характеристик ваттметра является его пороговая чувствительность (формула 3.42).

Обычно в качестве индикаторов ЭДС Холла используется гальванометр постоянного тока. Для улучшения пороговой чувствительности ваттметра следует использовать усилитель с синхронным детектором.

Несмотря на низкий коэффициент преобразования, измерители (ваттметры) на датчиках Холла позволяют измерять малые уровни мощности СВЧ. Это объясняется тем, что благодаря малому внутреннему сопротивлению эти датчики имеют низкий уровень шума (формула 3.43).

Для последующего усиления выгодно иметь сигнал на выходе датчика Холла переменным с частотой, соответствующей минимуму спектральной плотности шума транзисторного усилителя $f = 10$ кГц. Это достигается модуляцией СВЧ потока. С синхронным детектором, имеющим полосу пропускания 1 Гц, уровень входного шума усилителя составляет $5 \cdot 10^{-9}$ В.

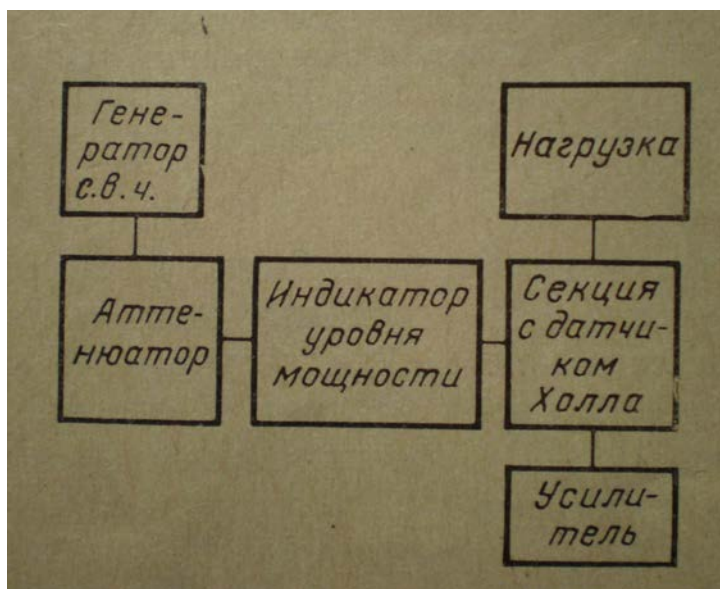


Рис. 3.12

В усилителе использованы два избирательных каскада с двойными Т – мостами в цепи обратной связи для уменьшения полосы пропускания. Для стабилизации коэффициента усиления служат несколько цепей глубокой отрицательной обратной связи. Чувствительность усилителя при соотношении сигнал / шум = 3 равна 0,02 мкВ, коэффициент усиления $7,5 \cdot 10^6$.

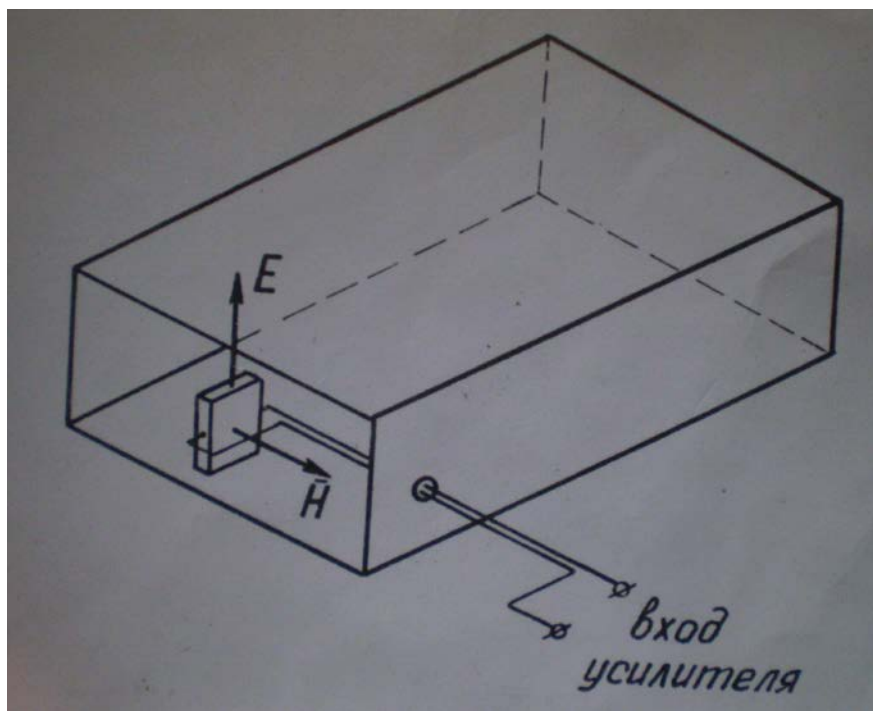


Рис. 3.13

Исследование ваттметра проводилось по блок – схеме, представленной рис. 3.12, на частоте 37750 МГц. Размещение двухэлектродного датчика Холла в волноводе (волна H_{10}) показано на рис. 3.13.

Датчик Холла изготовлен из InAs с параметрами : $n \sim 3,2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$, $\rho = 7 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $R_x = 165 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{Кл}$. Чувствительность датчика без усилителя равна $3,3 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}$, чувствительность этого же датчика с усилителем $1,7 \cdot 10^{-7} \text{ Вт}$.

3.11 Миниатюрный измеритель плотности потока мощности СВЧ диапазона на основе плёночных датчиков Холла.

Измерители мощности электромагнитного излучения на основе датчиков ЭДС Холла отличаются малыми размерами чувствительного элемента (датчика Холла) и весьма малыми возмущениями, вносимыми в измеряемое поле. Если размеры датчика меньше длины волны, ЭДС Холла пропорциональна плотности потока мощности СВЧ.

В отличие от кристаллических, плёночные датчики Холла обладают целым рядом преимуществ. Основными преимуществами являются уменьшение возмущения электромагнитного поля датчиком Холла, улучшение температурного режима датчиков при измерении больших уровней мощности СВЧ и более совершенная технология их изготовления.

Уменьшение возмущения электромагнитного поля датчиком определяется как общим уменьшением объёма, занимаемого плёночным датчиком, по сравнению с кристаллическим, так и тем фактом, что плёночный датчик становится радиопрозрачным при толщине плёнки меньшей, чем толщина скин-слоя. Улучшение температурного режима датчиков Холла достигается за счёт увеличения отношения площади поверхности датчика к занимаемому им объёму и уменьшения поглощаемой датчиком энергии электромагнитного поля.

Плёночные датчики изготавливались из $n - \text{InSb}$ с концентрацией носителей заряда 10^{22} м^{-3} . Плёнки получены методом мгновенного распыления в вакууме с последующей рекристаллизацией и напыляются на слюдяную подложку. Толщина плёнок (1 – 2) мкм. Напыление производится в вакууме не хуже 10^{-5} мм Нг . Максимальная подвижность носителей заряда – 2,4 $\text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Датчик имеет размеры $(4 \times 1,5) \text{ мм}^2$, выводы датчика выполнены из серебра, напылённого на слюдяную подложку, (фото рис.3.14). Для сравнения на фото показана спичка.

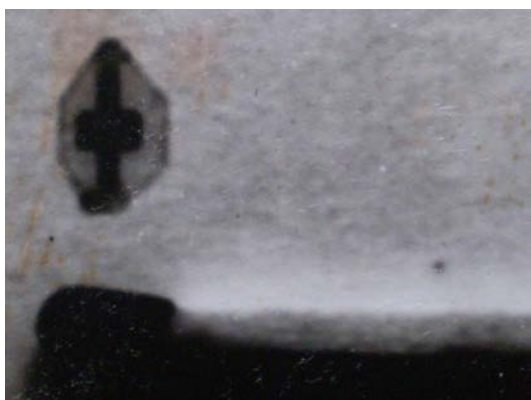


Рис. 3.14

Исследования миниатюрного измерителя проводились в сантиметровом диапазоне длин волн в волноводе и в свободном пространстве. Чувствительность измерителя составляет (10 – 20) мкВ на 1 мВт мощности СВЧ излучения, распространяющегося в стандартном волноводе сантиметрового диапазона, что соответствует примерно 1 мВ/мВт мощности электромагнитного излучения, проходящего через поперечное сечение датчика .

3.12 Автоматический регистратор проходящей мощности СВЧ диапазона на эффекте Холла.

Основным элементом измерителя является датчик Холла, который обладает рядом свойств, позволяющих использовать его для создания автоматического регистратора проходящей мощности электромагнитного излучения СВЧ диапазона.

ЭДС Холла пропорциональна плотности потока мощности электромагнитного излучения в месте расположения датчика, поэтому в отличие от

мостовых схем измерителей мощности СВЧ не требуется периодическая регулировка измерителя (установка нуля). Поскольку датчик ЭДС Холла является широкополосным измерителем, нет необходимости в дополнительных регулировках при изменении рабочей частоты генератора СВЧ. Датчик ЭДС Холла не чувствует стоячей волны, поэтому регистрируется лишь мощность, поступающая от генератора СВЧ в нагрузку.

Автоматический регистратор состоит из измерительной секции, усилителя, детектора и регистрирующего прибора. Измерительная секция представляет собой отрезок волновода или коаксиального кабеля с соединительными устройствами (фланцы или разъёмы) и датчика ЭДС Холла, размещённым внутри так, что вектор E параллелен большему ребру датчика, а вектор H перпендикулярен большей грани датчика.

3.13 Измеритель проходящей мощности модулированного СВЧ излучения с регулируемой чувствительностью.

Измеритель проходящей мощности СВЧ излучения с регулируемой чувствительностью (рис. 3.15) содержит датчик Холла 1, изготовленный из полупроводникового материала n -типа, выводы которого соединены с входом измерителя ЭДС Холла 2 через разделительный конденсатор 3. К холловским выводам дополнительно подключён источник постоянного тока 5 через переменный резистор 4. Ток измеряется с помощью индикатора 6. Подключение источника тока к цепи осуществляется с помощью переключателя 7. Контакты датчика Холла 1 обозначены буквами a и b .

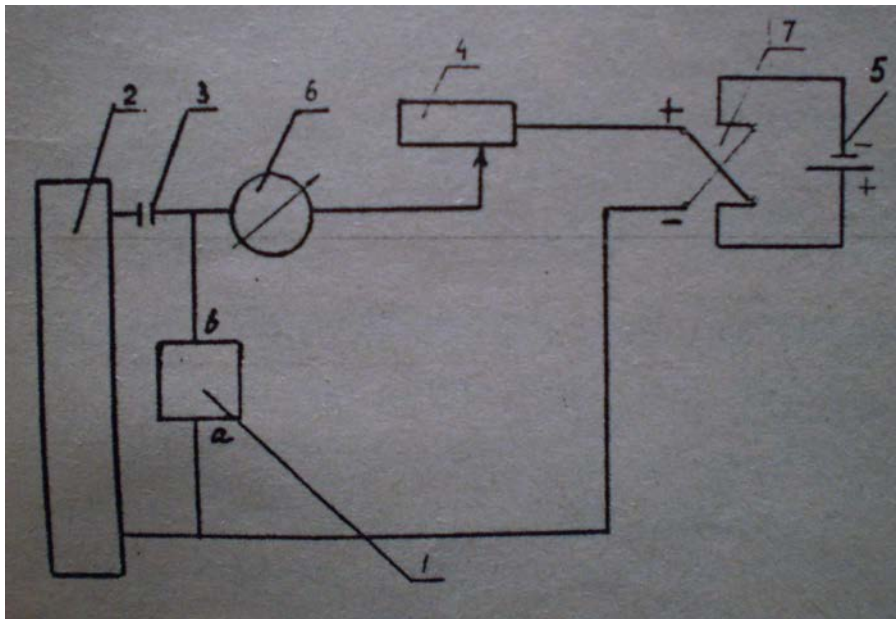


Рис. 3.15

Принципиальная возможность создания измерителя модулированной плотности потока мощности СВЧ с регулируемой чувствительностью основана на взаимодействии движущегося электрона с полем электромагнитной волны. При торможении электрона силой Лоренца, работа источника тока тратится на увеличение энергии волны в окрестности датчика и соответственно, ЭДС Холла. Через выводы датчика Холла пропускается постоянный ток регулируемой величины. Авторами экспериментально установлено, что при пропускании постоянного тока через выводы датчика Холла ЭДС может быть представлена в первом приближении в виде

$$E_H = E_{H0} + C \cdot I, \quad (3.28)$$

где E_{H0} - ЭДС Холла при отсутствии тока;

C - коэффициент пропорциональности;

I - постоянный ток, пропускаемый через выводы датчика Холла.

Следовательно, его чувствительность при пропускании постоянного тока определяется так:

$$\gamma = \gamma_0 + \gamma_1 I, \quad (3.29)$$

где γ_0 - чувствительность датчика при отсутствии тока.

Таким образом, при пропускании постоянного тока через выводы датчика Холла представляется возможным в процессе измерения регулировать его чувствительность.

Перед измерением двухэлектродный датчик Холла устанавливается в поперечное сечение волновода (рис.3.16) так, чтобы его выводы располагались вдоль направления распространения в нём электромагнитной волны.

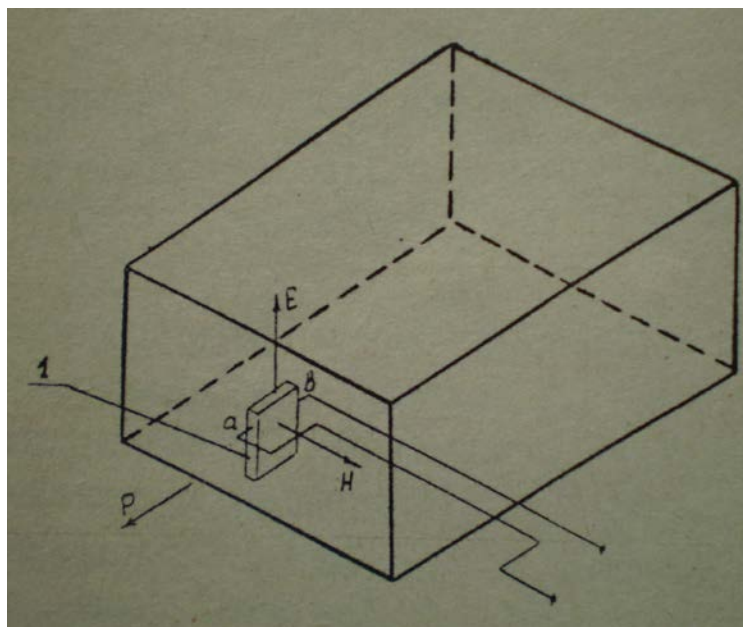


Рис.3.16

Если необходимо увеличить чувствительность, то при подключении источника тока нужно, чтобы носители заряда в датчике Холла двигались бы в направлении противоположном направлению распространения электромагнитной волны. В частности, поскольку в датчике Холла основными носителями заряда являются электроны, для увеличения чувствительности источник тока должен быть подключён так, чтобы направление тока в датчике Холла совпадало с направлением распространения электромагнитной волны, т.е. электроны двигались бы в направлении, противоположном направлению распространения волны, от а к b.

Экспериментальные исследования регулирования чувствительности проводились на частоте 10066 МГц. Модуляция осуществлялась меандром. ЭДС Холла измерялась с помощью широкополосного измерительного уси-

лителя УЗ-29, форма сигнала контролировалась осциллографом С1- 17. Использовался двухэлектродный датчик Холла из $n - \text{InSb}$ с концентрацией основных носителей заряда $n = 1,5 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$, подвижностью $\mu = 4,6 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, геометрическими размерами $(4 \times 2 \times 0,15) \text{ мм}^3$ и чувствительностью $\gamma_0 = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ В} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$.

Исследовалась зависимость чувствительности измерителя плотности потока мощности электромагнитного излучения от величины постоянного тока через контакты датчика Холла. Типичные результаты измерений приведены в таблице 3.3 и представлены на графике (рис.3.17)

Таблица 3.3

I, мА	U _Н , мкВ	γ , В·м ² /Вт
0	17	$1,7 \cdot 10^{-5}$
5	85	$8,5 \cdot 10^{-5}$
10	165	$16,5 \cdot 10^{-5}$
15	255	$25,5 \cdot 10^{-5}$

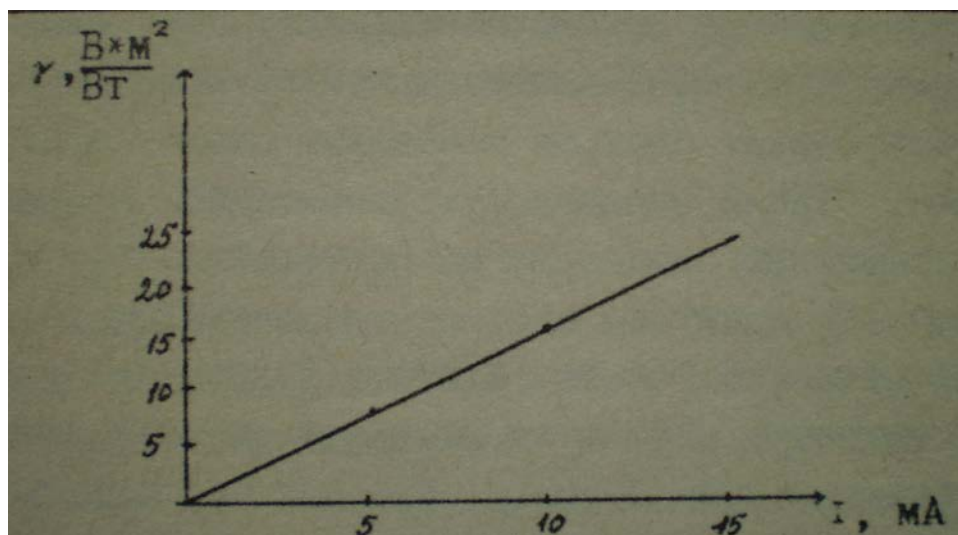


Рис. 3.17

Аналогичные результаты получены при различной плотности потока мощности электромагнитного излучения и для других частот. Изменение направления постоянного тока вызывает уменьшение чувствительности датчика Холла. Приведённые данные свидетельствуют, что пропускание постоянного тока через электроды датчика Холла позволяет регулировать чувствительность в определённых пределах.

3.14 Использование эффекта магнитосопротивления для измерения проходящей мощности СВЧ.

К методам измерения мощности СВЧ, основанным на взаимодействии составляющих электромагнитного поля с движущимися носителями заряда в полупроводнике, относится и эффект изменения сопротивления в магнитном поле (эффект Гаусса).

Возможность применения эффекта магнитосопротивления к измерению мощности СВЧ основывается на так называемом умножающем его действии. Действительно, если датчик магнитосопротивления разместить в волноводе с волной типа H_{10} так, как показано на рис.3.18, а постоянное магнитное поле приложить перпендикулярно плоскости датчика, то мгновенное значение тока, наводимого в датчике, будет иметь вид

$$I = \beta E_y \cos(\omega t + \varphi) \quad (3.30)$$

где β – коэффициент пропорциональности, E_y – амплитуда напряжённости электрического поля по оси y , ω – круговая частота, φ – сдвиг фазы между током и электрическим полем.

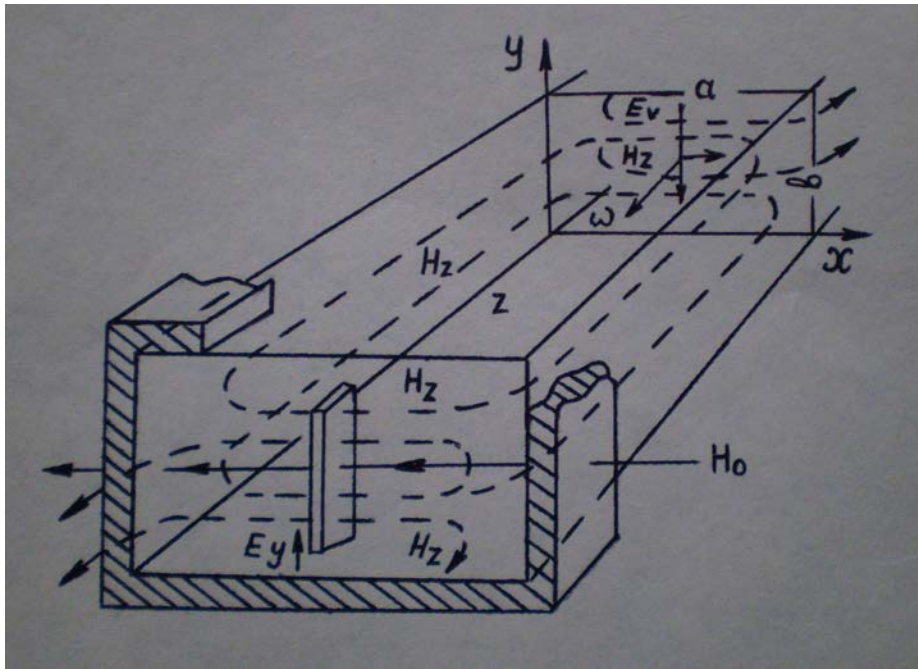


Рис. 3.18

Если эффект магнитосопротивления на СВЧ существует, то сопротивление датчика равно

$$R = R_0 + mH_x \cos \omega t, \quad (3.31)$$

где R_0 – начальное сопротивление, зависящее от величины внешнего магнитного поля H_0 , направленного по оси x и смещающего рабочую точку;

H_x – амплитудное значение x -компоненты магнитного поля волны в волноводе;

$$m = \left(\frac{dR}{dH} \right)_{H_0} - \text{коэффициент, характеризующий крутизну зависимости}$$

$R(H)$ при данном постоянном магнитном поле H_0 .

Если током смещения в образце можно пренебречь по сравнению с компонентой тока, проводимости, то, перемножая (3.30) и (3.31), можно записать

$$IR = \beta R_0 E_y \cos(\omega t + \varphi) + \frac{\beta m E_y H_x}{2} (\cos(2\omega t + \varphi) + \cos \varphi) \quad (3.32)$$

Постоянная составляющая величины напряжения, обусловленная эффектом магнитосопротивления, равна

$$V_G = \frac{\beta m E_y H_x \cos \varphi}{2} \quad (3.33)$$

Если током смещения можно пренебречь, то $\cos \varphi = 1$, тогда

$$V_G = \frac{\beta m E_y H_x}{2} = \frac{\beta m P}{2} \quad (3.340)$$

будет представлять ту постоянную составляющую напряжения, снимаемую с образца, которая пропорциональна проходящей мощности электромагнитной волны.

Экспериментальное исследование эффекта магнитосопротивления в диапазоне СВЧ проводилось по блок-схеме представленной на рис.3.19. В этой установке: 1 – клистронный генератор с частотой 9870 МГц с максимальной мощностью 800 мВт в непрерывном режиме, 2 – аттенюатор типа Д5 – 5, 3 – индикатор уровня мощности, 4 – секция с датчиком магнитосопротивления, 5 – индикатор напряжения Ф – 116/1, 6 – поглощающая нагрузка.

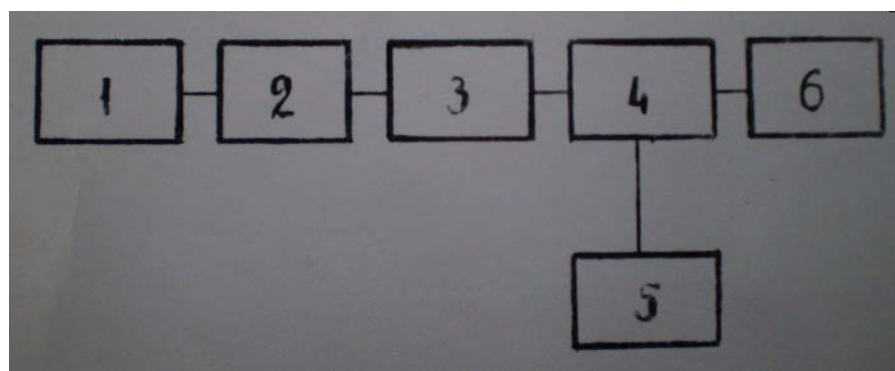


Рис. 3.19

Размещение образца в волноводе показано на рис.3.18. Секция с датчиком магнитосопротивления располагалась между полюсами электромагнита, напряжённость магнитного поля которого равнялась 350 кА/м. Такая напряжённость магнитного поля соответствует рабочей точке на линейном участке характеристики датчика № 1 на постоянном токе (рис.3.20). Для ис-

следования в диапазоне СВЧ были отобраны образцы, на которых наблюдался максимальный эффект на постоянном токе, образцы № 1 – 4.

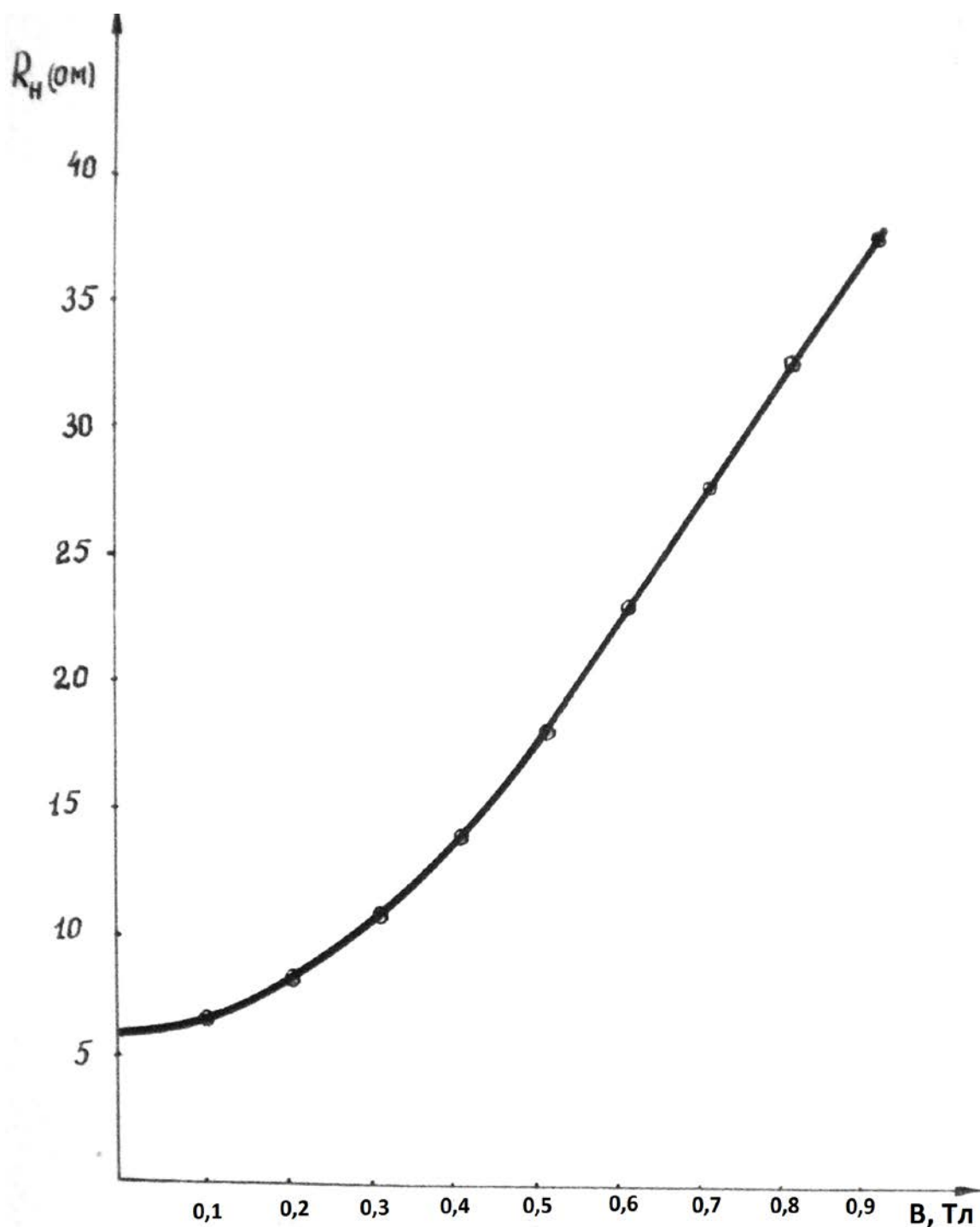


Рис. 3.20

Для указанных образцов была измерена зависимость выходного напряжения, обусловленного эффектом магнитосопротивления, от величины

проходящей мощности на частоте 9870 МГц. Результаты измерений приведены на рис.3.21, где представлена зависимость напряжения, обусловленного эффектом магнитосопротивления, от величины проходящей мощности при $H_0 = 350$ кА/м для четырёх датчиков из которого видно, что для всех исследуемых образцов эта зависимость носит линейный характер. Разный наклон прямых свидетельствует о различной чувствительности датчиков.

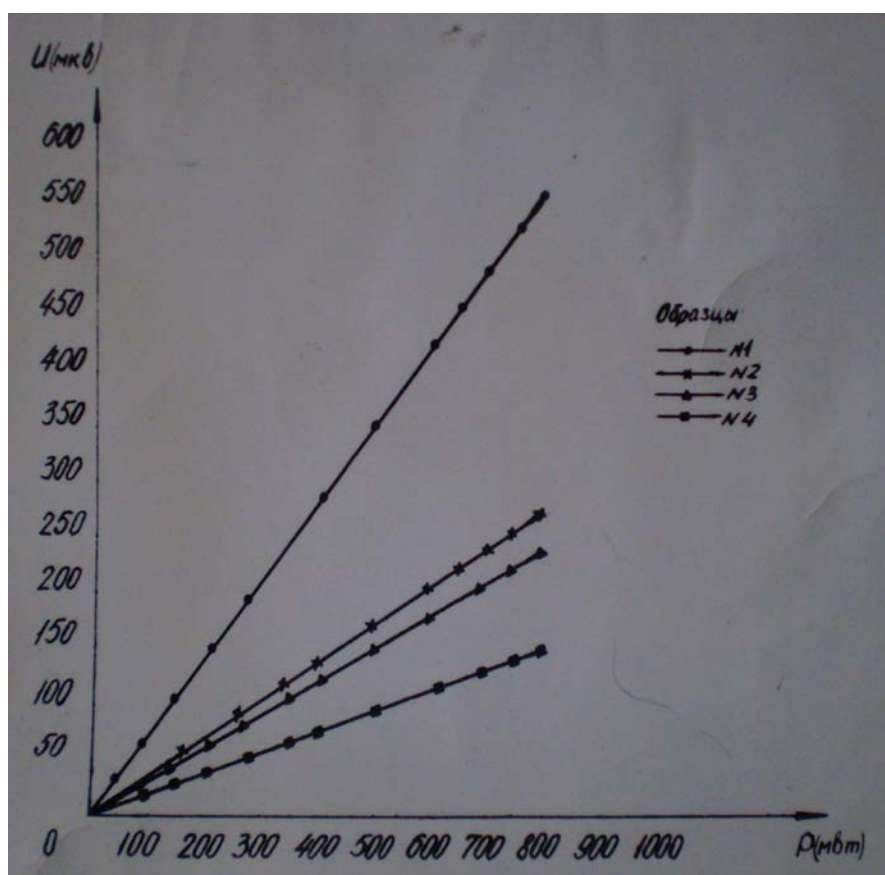


Рис. 3. 21

Необходимо отметить, что при исследовании некоторых образцов наблюдался эффект частичного выпрямления, в частности, он имел место при снятии вольт – амперной характеристики образца на характериографе. Эффект выпрямления исключался отбором образцов. Для измерений применялись лишь образцы, имеющие линейную вольтамперную характеристику.

Кроме того, эффект выпрямления, а также и болометрический эффект можно выявить, измеряя постоянное напряжение на образце в поле СВЧ при нулевом постоянном магнитном поле. Как видно из рис.3.20, при

$H_0 = 0$ величина m также равна нулю и эффект магнитосопротивления отсутствует. Если в этом случае напряжение на образце не равно нулю, то имеем эффект выпрямления.

Было проведено исследование распределения плотности потока мощности СВЧ в волноводе с помощью датчика магнитосопротивления, для чего образец размещался в разных местах по сечению волновода. Результаты экспериментального исследования приведены на рис 3.22, где сплошная линия – теоретическое распределение плотности потока мощности СВЧ, пунктирная – экспериментальное распределение.

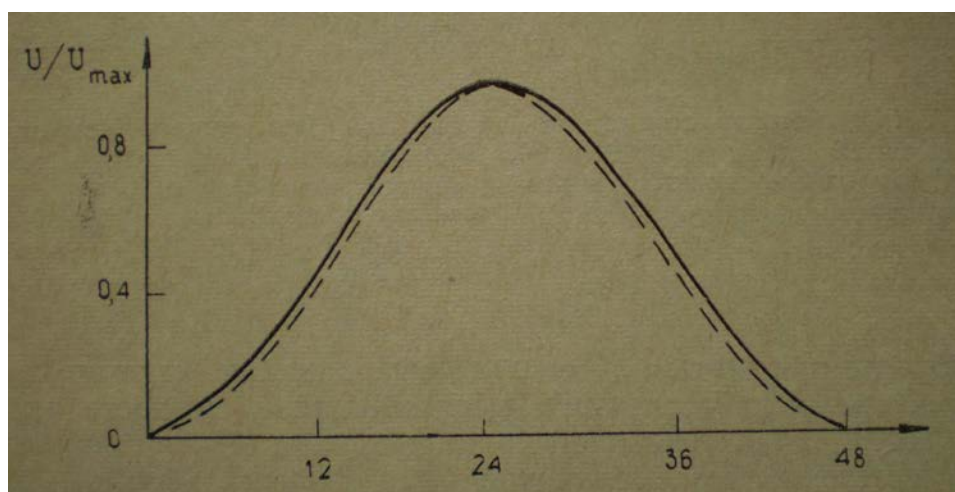


Рис. 3.22

Полученные результаты свидетельствуют о том, что датчик магнитосопротивления, как и датчик Холла, является индикатором плотности потока мощности СВЧ в месте его расположения и позволяет измерять проходящую мощность.

Экспериментальные результаты показали:

а. хорошую линейную зависимость выходного напряжения, снимаемого с датчика, от величины проходящей мощности;

б. зависимость показаний образца от расположения его относительно открытого конца волновода, что характеризует зависимость его показаний

от распределения СВЧ мощности, и малое искажение, вносимое образцом в это распределение.

Исходя из теоретического и экспериментального эффекта, можно сделать вывод, что ваттметры на основе датчиков магнитосопротивления имеют определённые преимущества перед другими измерителями мощности СВЧ, а именно:

1. малую инерционность, связанную с тем, что время релаксации носителей заряда составляет $\sim 10^{-12}$ сек, в результате чего эти ваттметры можно использовать для измерения импульсной мощности;
2. малую рассеиваемую мощность на датчике, работающем в режиме проходящей мощности, что позволяет измерять их высокие уровни;
3. простоту измерительной схемы.

ГЛАВА 4. Дифракция электромагнитных волн на датчике Холла.

4.1 Решение задачи о дифракции электромагнитных волн СВЧ диапазона на датчике Холла.

Как и всякий измерительный прибор, датчик Холла вносит искажения в исследуемое им электромагнитное поле. Это обусловлено тем, что под действием падающего поля, на поверхности датчика возникают токи, создающие поле вторичного излучения. Это поле, складываясь с падающим полем, искажает его, поэтому при рассмотрении точности измерений, проводимых при помощи датчиков Холла необходимо учитывать погрешности за счет вторичного излучения датчиков. Особенно существенным поле вторичного излучения становится в случае, если несколько датчиков Холла располагаются вблизи друг от друга, так как оно может привести к взаимному влиянию датчиков друг на друга. Кроме того, возмущение падающего поля

полем вторичного излучения датчика, и токи на поверхности датчика, существенно зависят от рабочей частоты. Это может привести к частотной зависимости чувствительности датчика Холла.

В связи с этим и рассматриваются вопросы определения значения высокочастотных токов на поверхности датчиков Холла, распределение токов на поверхности датчиков, а также поле вторичного излучения датчиков. Полученные результаты используются для расчета чувствительности датчиков Холла на СВЧ, для исследования частотной зависимости чувствительности датчиков, а также для определения искажений, вносимых датчиками в исследуемое поле, и взаимного влияния датчиков.

4.1.1 Взаимодействие датчиков Холла с электромагнитным полем СВЧ.

Как уже упоминалось выше, если датчик находится в электромагнитном поле, то возникает поле вторичного излучения. Полное поле в этом случае, представляющееся суммой падающего поля и вторичного,

$$H = H_{\text{пад}} + H_{\text{втор}} \quad (4.1)$$

должно удовлетворять уравнениям Максвелла и граничным условиям на поверхности датчика. При зависимости падающего поля от времени $\exp(-i\omega t)$ уравнения Максвелла имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \text{rot} \vec{E} &= i\omega\mu_0\mu\vec{H}, \\ \text{rot} \vec{H} &= -i\omega\varepsilon_0\varepsilon\vec{E}. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Поскольку строгое решение поставленной задачи встречает значительные трудности, во-первых, из-за невозможности сведения векторных уравнений (4.3) к скалярному уравнению и, во-вторых, из-за невозможности разделения переменных в системе координат, в которой координатные поверхности совпадают с поверхностью датчика. Поэтому целесообразно перейти к интегральной форме уравнений Максвелла и попытаться найти чис-

ленное решение интегрального уравнения для полей на поверхности датчика. Запишем интегральное соотношение Кирхгофа [22]

$$H(\vec{r}) = H_{nao'}(\vec{r}) + \frac{1}{4\pi} \int_S \left(-i\omega\varepsilon_0\varepsilon\nu[\vec{E} \times \vec{n}] + [[\vec{H} \times \vec{n}] \times grad\nu] - (\vec{n}, \vec{H}) grad\nu \right) dS', \quad (4,3)$$

где $\nu(r, r') = \frac{\exp(ik\rho)}{\rho}$;

$$\rho = |\vec{r} - \vec{r}'|;$$

\vec{r} -- радиус-вектор точки наблюдения;

\vec{r}' -- радиус-вектор текущей точки интегрирования;

ω - частота электромагнитных колебаний;

\vec{n} - внутренняя нормаль к поверхности тела;

\vec{E} - напряженность электрической составляющей электромагнитного поля;

\vec{H} - напряженность магнитной составляющей электромагнитного поля.

Опуская точку наблюдения на поверхность датчика и воспользовавшись граничными условиями Леонтовича на поверхности тела [23]

$$[\vec{n} \times \vec{E}] = -Z[\vec{n} \times [\vec{n} \times \vec{H}]], \quad (4.4)$$

где Z - импеданс поверхности датчика, получим интегральное уравнение для поля на поверхности датчика

$$\vec{H}(r) = 2\vec{H}_{nao'}(r) + \frac{1}{2\pi} \int_S \left(i\omega\varepsilon_0\varepsilon Z\nu(\vec{n}(\vec{H}, \vec{n}) - \vec{H}) + \vec{H}(grad\nu, \vec{n}) - \vec{n}(grad\nu, \vec{H}) - grad\nu(\vec{n}, \vec{H}) \right) dS' \quad (4.5)$$

Воспользуемся сферической системой координат, начало которой помещено в центр симметрии датчика. Ось Z направлена параллелью большему ребру датчика ℓ , а азимутальный угол Φ отсчитывается от направле-

ния параллельного ребру (рис.6). В этой системе координат уравнение поверхности датчика имеет следующий вид:

$$R(\theta, \varphi) = \vec{e}_r \frac{q}{\sin \theta}, \text{ при } q|\operatorname{ctg} \theta| \leq \frac{l}{2};$$

$$\vec{R}(\theta, \varphi) = \vec{e}_r \frac{l}{2|\cos \theta|}, \text{ при } q|\operatorname{ctg} \theta| \geq \frac{l}{2}, \quad (4.6)$$

где $q = \frac{b}{2|\cos \varphi|}, \text{ при } \frac{b}{2}|\operatorname{tg} \varphi| \leq \frac{d}{2};$

$$q = \frac{d}{2|\sin \varphi|}, \text{ при } \frac{b}{2}|\operatorname{tg} \varphi| \geq \frac{d}{2}.$$

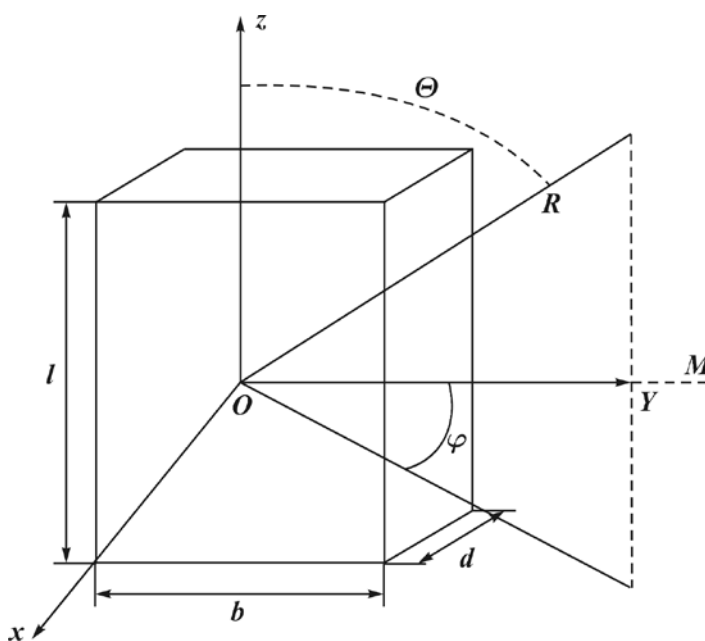


Рис. 4.1

Нами использовался метод последовательных приближений. Этот метод позволяет описывать распределение поля на поверхности датчика значительно точнее, и количество точек, в которых вычисляются поля, определяется практически лишь затрачиваемым временем. Однако у этого метода есть свои трудности, а именно, вопрос о сходимости процесса после-

довательных приближений. Причем процесс может оказаться расходящимся, как вследствие свойств оператора процесса, так и вследствие неточности вычислений интеграла.

В качестве первого приближения выбирается поле тождественно равное нулю на поверхности датчика. Второе приближение, согласно уравнению (4.5), получается равным удвоенному падающему полю. Третье приближение получается подстановкой в правую часть уравнения (4.5) второго приближения; аналогично вычисляются следующие приближения. Процесс последовательных приближений контролируется относительной разностью η_n , которая определяется следующим соотношением:

$$\eta_n = \max \left(\frac{|\vec{H}^{n+1}(\theta, \varphi) - \vec{H}^n(\theta, \varphi)|}{|\vec{H}^n(\theta, \varphi)|} \right), \quad (4.7)$$

где n – число приближений.

Процесс последовательных приближений прерывается либо при выполнении условия

$$\eta_n \leq \eta_0,$$

где η_0 - заданное число,

либо в первом минимуме η_n , если η_n окажется осциллирующей из-за неточности вычислений.

Рассчитанные таким образом поля на поверхности датчика используются для вычисления поля, переизлученного датчиком. Вычисление вторичного поля производится по следующей формуле:

$$\vec{H}_{\text{втор}}(r) = \frac{1}{4\pi} \int_S \left(i\omega \varepsilon_0 \varepsilon Z V [\vec{n} [\vec{n}, \vec{H}]] - [[\vec{H}, n] \text{grad} v] - (\vec{n}, \vec{H}) \text{grad} v \right) dS' \quad (4.8)$$

4.2 Расчёт токов и полей на поверхности датчиков Холла и экспериментальное исследование их параметров.

В результате решения задачи дифракции электромагнитных волн на датчиках Холла был произведен расчет плотности тока j и напряжённости

магнитного поля H на поверхности датчика Холла из n -InSb с проводимостью $\sigma = 1,85 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-1}$ с размерами $l = 2 \text{ мм}$; $b = 1 \text{ мм}$; $d = 0,1 \text{ мм}$ для следующих длин волн $\lambda = 5 \text{ см}$; 3 см ; $0,8 \text{ см}$; $0,4 \text{ см}$; $0,2 \text{ см}$. Расчеты производились для одного и того же значения мощности падающего поля.

Из результатов расчета следует, что переизлученное датчиком Холла электромагнитное поле на расстоянии λ от центра датчика на порядок меньше величины падающего поля (толщина датчика равна толщине скин-слоя на данной частоте, а длина $\frac{\lambda}{2}$).

Для проверки взаимного влияния датчиков Холла в диапазоне СВЧ было исследовано распределение плотности потока мощности СВЧ – диапазона сначала поочередно двумя датчиками (датчик 1 и датчик 2) в фокальной плоскости радио оптической системы (рис.4.2), где 1 – генератор СВЧ; 2 – радио оптическая система (РОС); 3 – фокальная плоскость РОС. Затем это же распределение исследовалось одновременно датчиком 1 и датчиком 2 (рис. 4.3 – 4.5).

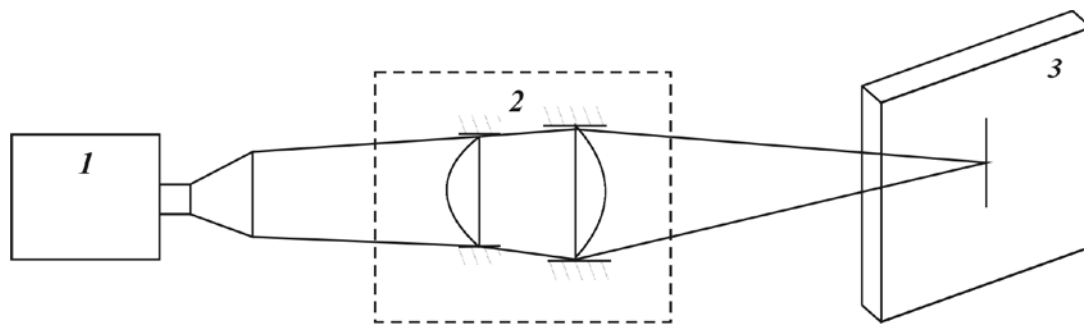


Рис. 4.2

На рисунке 4.3 представлено распределение плотности потока мощности, снятое датчиком № 1, а на рисунке 4.4 – датчиком № 2. На рисунке 4.5 представлено это же распределение, снятое системой из двух датчиков, расположенных на расстоянии 7 мм друг от друга.

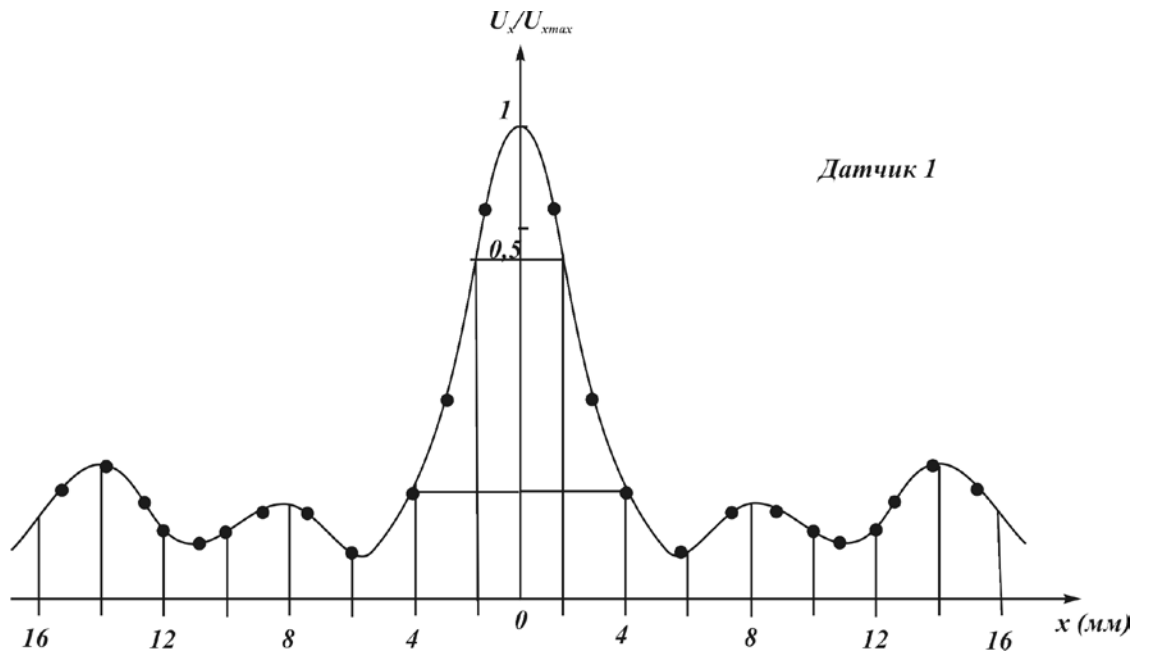


Рис. 4.3

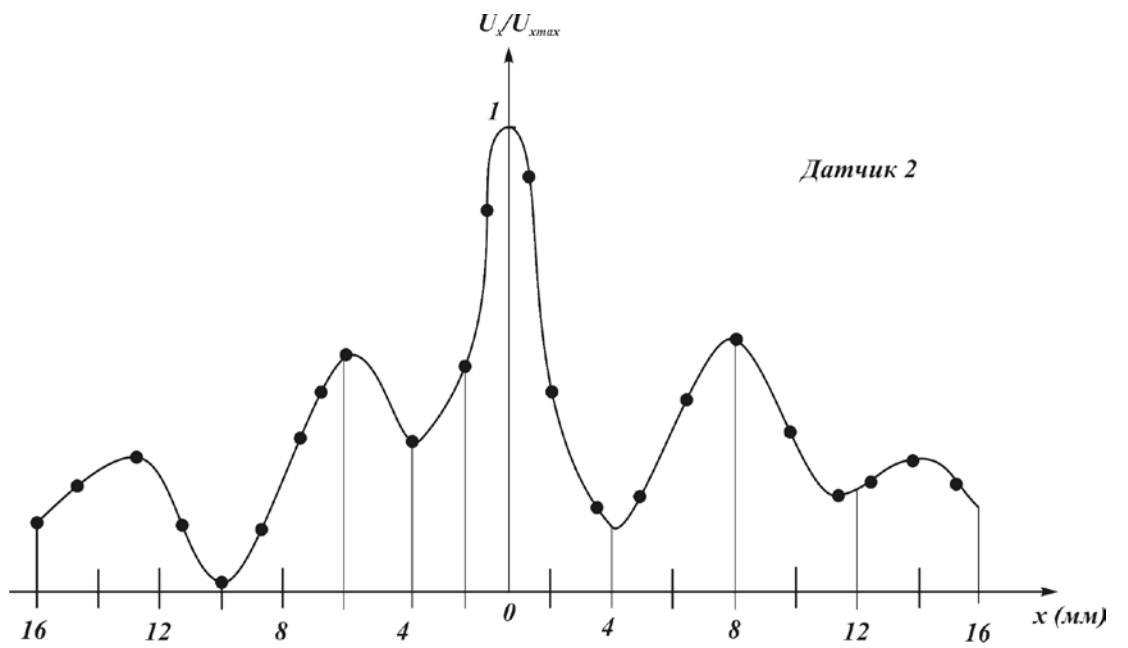


Рис. 4.4

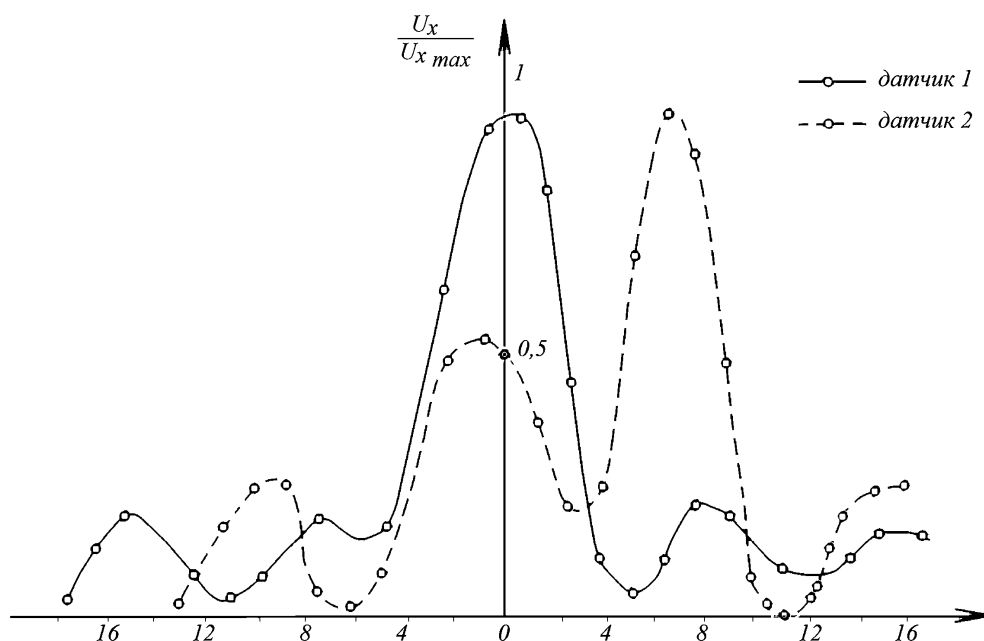


Рис. 4.5

Приведенные рисунки свидетельствуют о том, что характер кривых не претерпевает заметных искажений из-за взаимного влияния, и, следовательно, датчики Холла могут использоваться для анализа тонкой структуры электромагнитного поля СВЧ – диапазона.

4.3 Экспериментальная проверка частотной зависимости чувствительности датчиков Холла

Остановимся на исследовании условий, при которых частотная зависимость чувствительности датчиков Холла в диапазоне СВЧ мало существенна и ею можно пренебречь с определенной степенью точности [23].

Для этого найдем значения плотности тока j и напряжённости магнитного поля H на поверхности датчика Холла из n - InSb с проводимостью $\sigma = 1,85 \cdot 10^4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ с размерами $l = 2 \text{ мм}$; $b = 1 \text{ мм}$; $d = 0,1 \text{ мм}$. Определение токов и полей на поверхности датчика проводилось путем численного интегрирования уравнений Максвелла, решение находилось методом последовательных приближений. Расчеты были выполнены при одном и том же значении

мощности падающего поля для следующих длин волн:

$$\lambda = 5\text{см}; 3\text{см}; 0,8\text{см}; 0,4\text{см}; 0,2\text{см} .$$

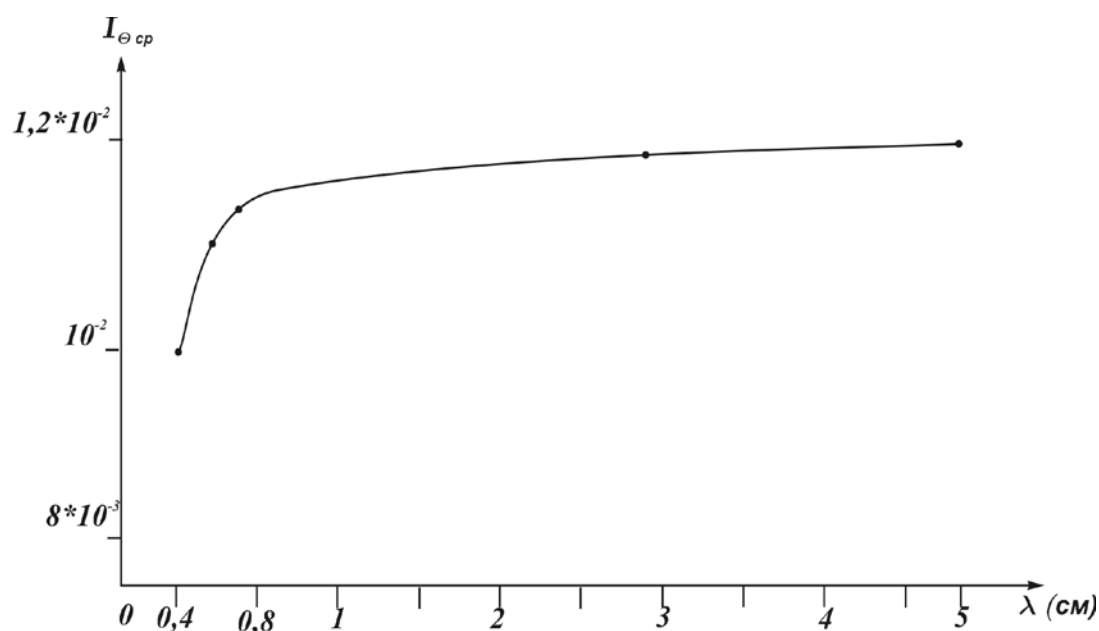


Рис.4.6

На рис. 4.6 представлено среднее значение продольной составляющей тока на поверхности датчика Холла от частоты. Усреднение проводилось по всей поверхности датчика Холла.

Приведенные результаты показывают, что средний ток на поверхности датчика при $\frac{\lambda}{l} \geq 2$ практически не зависит от частоты. В интервале изменения частоты $2 \geq \frac{\lambda}{l} \geq 1$ частотная зависимость очень слабая (средний ток изменяется в этом интервале на 16% от его стационарного значения). Следовательно, частотной зависимостью чувствительности датчика, обусловленной дифракционными искажениями поля, можно пренебрегать при выполнении условия

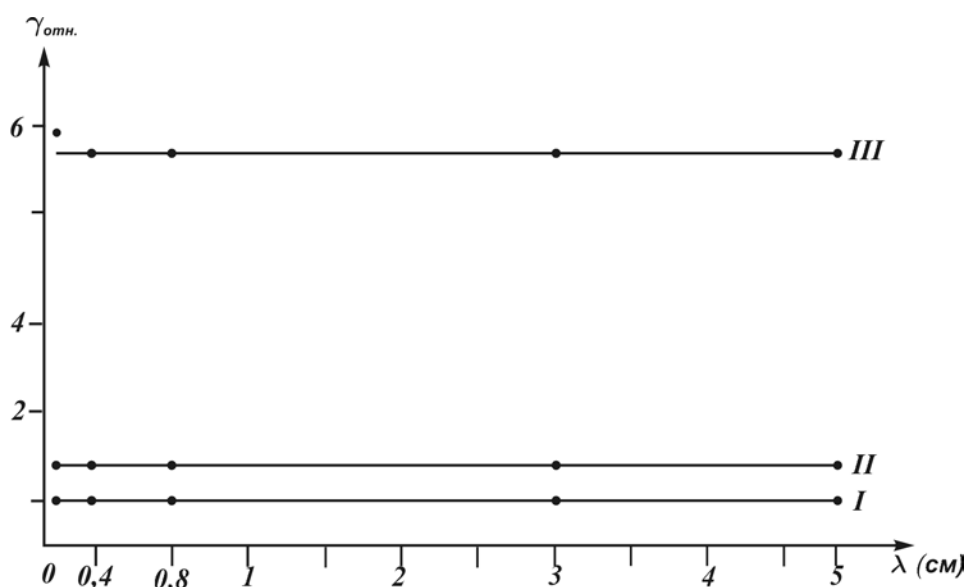
$$\frac{\lambda}{l} \geq 2. \tag{4.9}$$

При выполнении условия (4.9) коэффициент пропорциональности среднего тока на поверхности датчика с точностью до 5% не зависит от ча-

стоты. Поскольку значение произведения $(\omega\tau)^2$, по литературным данным вплоть до значения $\lambda = 2\text{мм}$ много меньше единицы, то, согласно приведенным результатам расчета, чувствительность γ не должна зависеть от частоты при выполнении условия (4.9).

Для экспериментальной проверки частотной зависимости чувствительности датчиков Холла требуется весьма тонкая калибровка мощности в широком диапазоне частот (0,2-5) см. Имеющиеся в нашем распоряжении приборы не позволяли контролировать уровень мощности в этом диапазоне. Поэтому для датчиков Холла был применен следующий метод.

Выбиралось три датчика, один из которых служил контрольным, а два других отличались от него либо размерами, либо материалом. Следовательно, если частотная зависимость чувствительности есть, то она должна быть различной для всех трех датчиков. При калибровке мощности по контрольному датчику отсутствие частотной зависимости отсчетов двух других датчиков должно свидетельствовать об отсутствии частотной зависимости чувствительности датчиков. Результаты усредняются по четырем замерам. На рис 4.7 приведены значения γ для трех датчиков в зависимости от частоты. Результаты измерений показывают, что чувствительность датчиков Холла действительно не зависит от частоты по крайней мере до тех пор пока $\lambda \geq l$.



Таким образом:

1. теоретически и экспериментально показано отсутствие частотной зависимости чувствительности датчиков Холла, обусловленной дифракционными искажениями падающего поля при соблюдении условия $\lambda/l \geq 2$;

2. экспериментально обнаружена возможность использования одного и того же двухэлектродного датчика Холла для измерения мощности сантиметрового и миллиметрового диапазонов.

4.4 Экспериментальная проверка точности датчиков Холла.

При использовании датчиков Холла для исследования тонкой структуры электромагнитного поля СВЧ – диапазона одним из наиболее значимых характеристик является его точность. Экспериментальное исследование точности датчика Холла в диапазоне СВЧ проводилось на установке, блок-схема которой приведена на рис.4.8, где 13 – генератор ГЗ-26; 2 – коаксиальный волноводный переход; 3,4 – T – мосты; 5 – рупорный излучатель; 6 – волноводная секция; 7,9 – волноводная секция стандартного трехсантиметрового сечения $28,5 \times 12,5 \text{ мм}^2$ с датчиком Холла, который с помощью специального устройства перемещается вдоль оси X поперечного сечения волновода с точностью отсчета 0,1мм; 10 – линза из фторопласта; 11 – датчик Холла; 12 – усилитель низкой частоты со стрелочным индикатором; 1 – аттенюатор типа Д5-5, позволяющий ослабить уровень мощности от 0 до 50 дБ; 8,15 – металл – полупроводниковая структура с закорачивающим поршнем; 14 – фотоаппарат. Исследовалось распределение плотности потока мощности СВЧ датчиком Холла из n – JnSb, в месте расположения которого находилась метало -полупроводниковая структура, представляющая собой вместе с закорачивающим поршнем резонансную согласованную нагрузку, не искажающую электромагнитного поля внутри волновода. Металл – полу-

проводниковая структура позволяет получить непрерывное визуальное изображение распределения плотности потока мощности СВЧ в волноводе.

Видимая картина распределения плотности потока мощности СВЧ фотографируется на микрофотомере МФ – 2.

На рис 4.9 – 4.15 приведены результаты фотометрирования негативов.

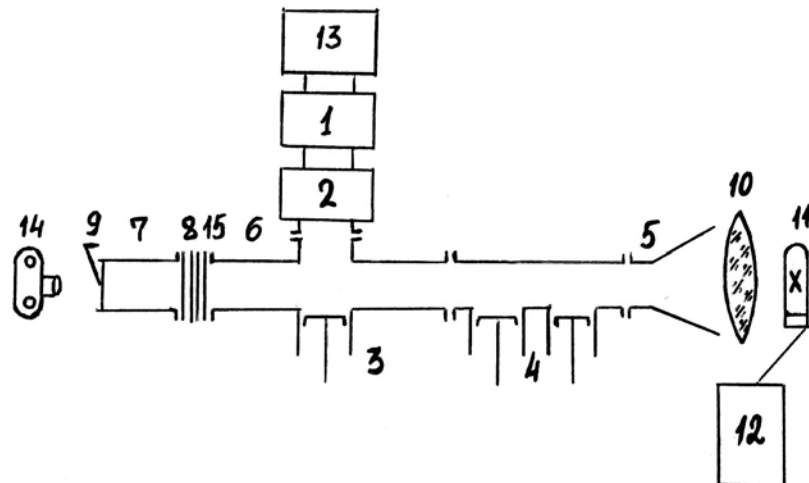


Рис. 4.8

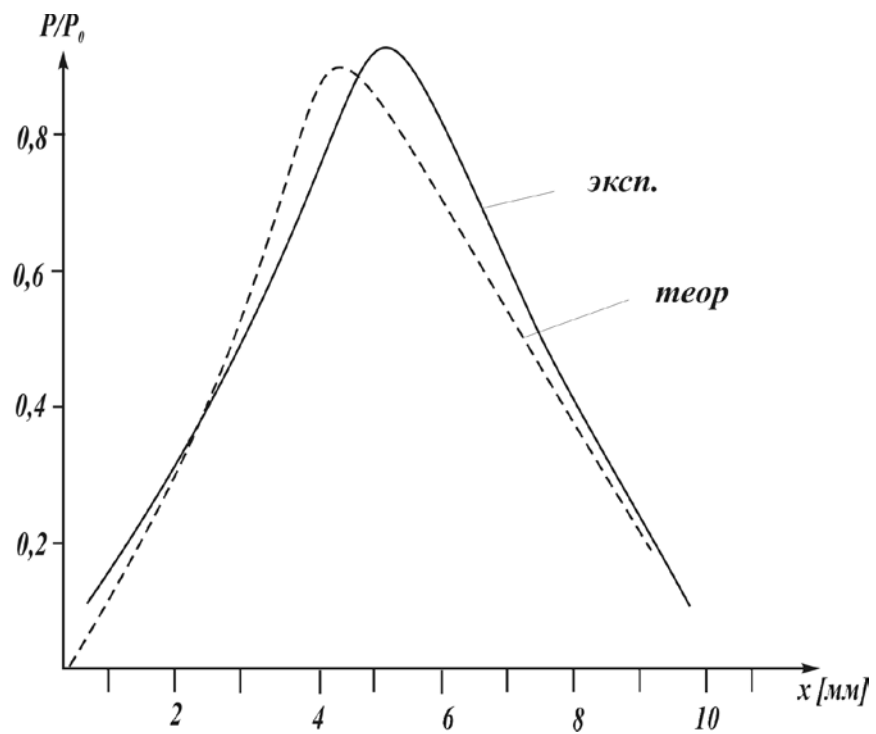


Рис. 4.9

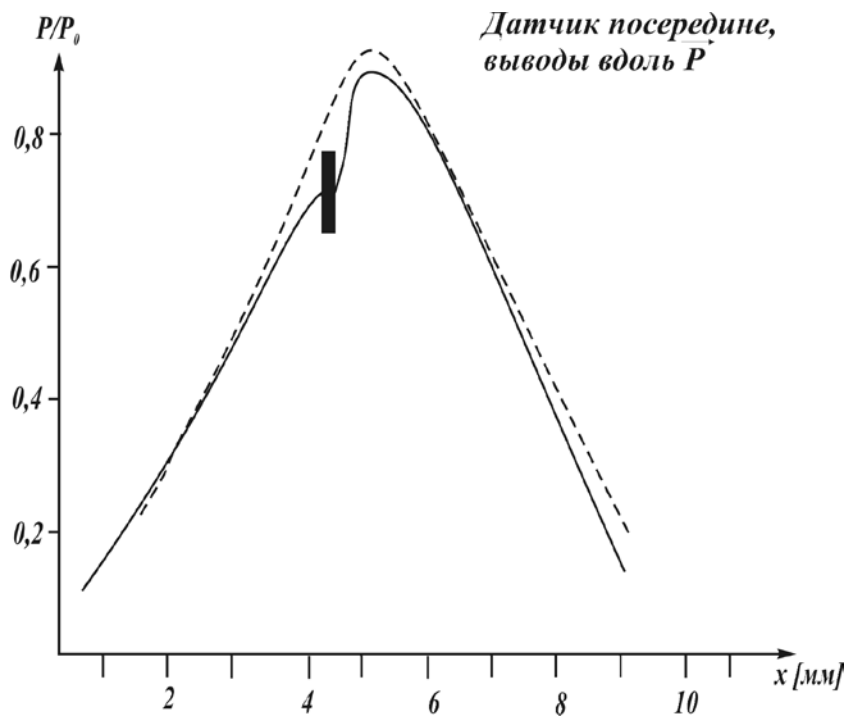


Рис. 4.10

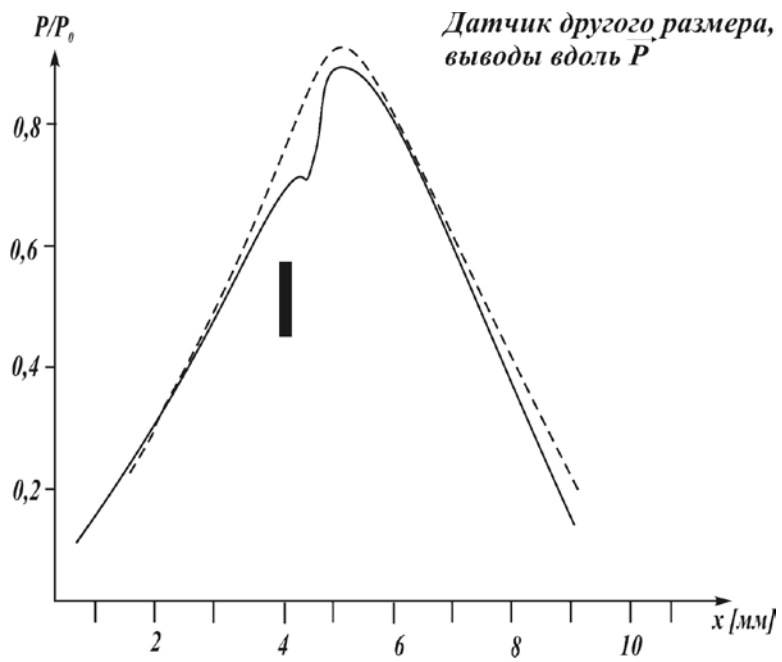


Рис. 4.11

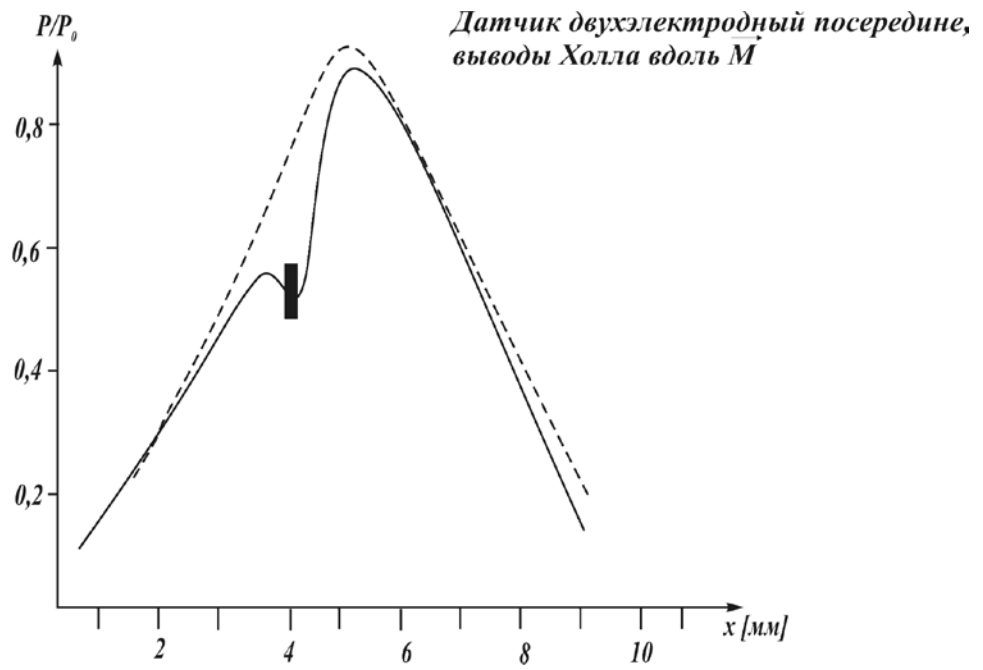


Рис. 4.12

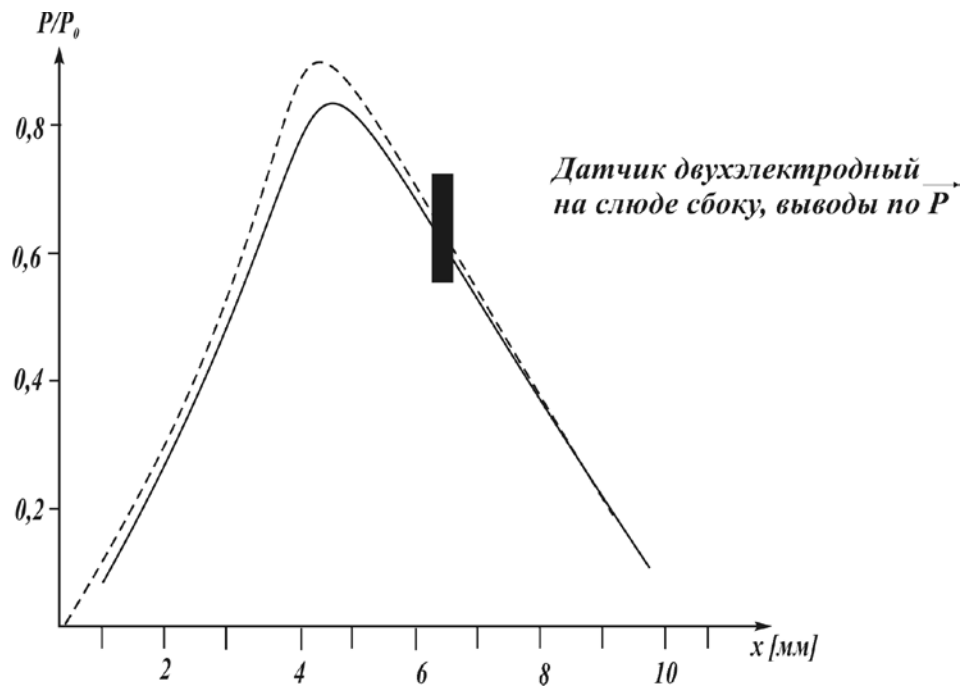


Рис. 4.13

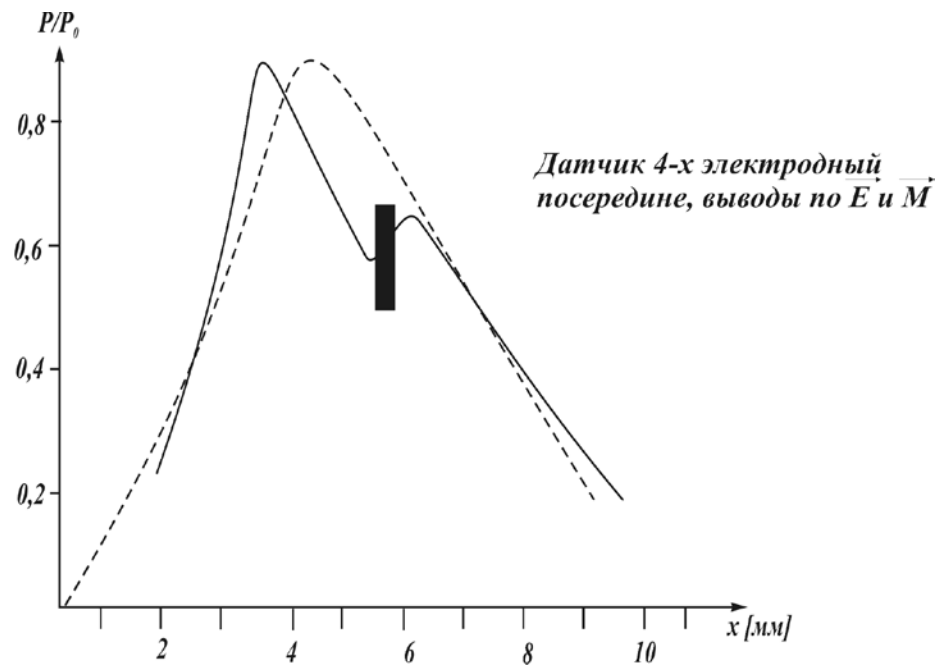


Рис.4.14

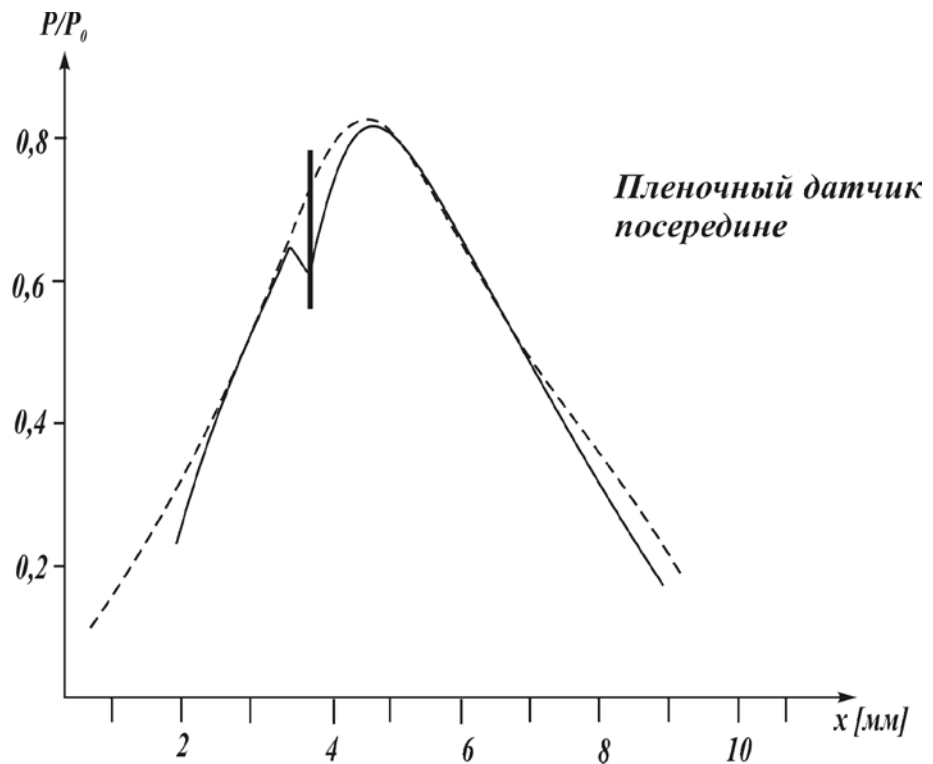


Рис. 4.15

Именно, таким образом, проверялись на точность датчики Холла различной конфигурации с четырьмя и двумя выводами, кристаллические и пленочные.

Эксперименты показали, что искажения плотности потока мощности СВЧ (т.е. электромагнитного поля СВЧ) исследуемой датчиками Холла весьма малы и заметны лишь в непосредственной близости от поверхности датчика, причем наименьшую величину искажения вносят двухэлектродные кристаллические и пленочные датчики Холла.

4.5 Экспериментальное исследование распределения плотности потока мощности СВЧ в волноводе и в ближней зоне рупора двухэлектродным датчиком Холла.

Рассмотрим применение датчиков Холла для исследования распределения плотности потока мощности СВЧ диапазона. Было исследовано распределение плотности потока мощности в волноводе и в ближней зоне рупора. Датчик изготовлен из $n - \text{JnSb}$ с размерами $(2 \times 1 \times 0,1) \text{ мм}^3$.

Как известно, ЭДС Холла в диапазоне СВЧ определяется следующим соотношением

$$U_H = \mu_0 \mu \cdot ubP, \quad (4.12)$$

где μ_0 - магнитная постоянная;

μ - магнитная проницаемость датчика Холла;

b - ширина датчика;

u - подвижность носителей заряда (в данном случае электронов);

P - плотность потока мощности СВЧ в месте расположения датчика Холла.

Как видно из формулы (4.12), однозначное соответствие между ЭДС Холла и плотностью потока мощности СВЧ в месте расположения датчика позволяет использовать его не только для измерения проходящей мощности но и для исследования структуры электромагнитного поля СВЧ – диапазона.

Исследования структуры электромагнитного поля имеют важное значение при работе с передающими, приемными и канализирующими

устройствами, а также при создании радиоинтроскопов и систем радиовидения.

Однако, решить эту задачу с помощью обычных антенн СВЧ диапазона затруднительно, поскольку все эти антенны являются пространственно-усредняющими. Это связано с тем, что эффективно работающие антенны СВЧ имеют размеры превосходящие длину волны или, в крайнем случае, сравнимые с ней.

Авторами предложен метод исследования структуры электромагнитного поля СВЧ диапазона - метод, использующий эффект Холла в полупроводниках, который имеет определенные преимущества перед другими методами исследования вследствие малых размеров датчика и малых искажений, которые он вносит в распределение плотности потока мощности электромагнитного поля СВЧ диапазона длин волн [24].

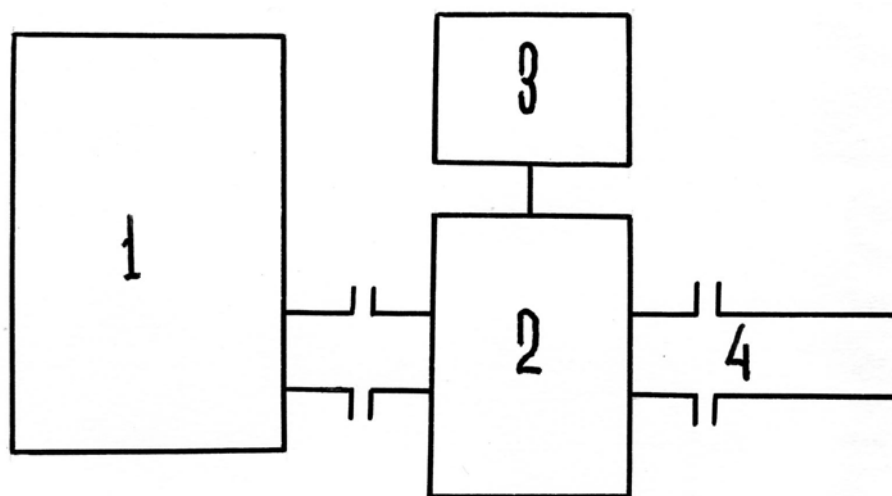


Рис. 4.16

Проверка влияния искажения, вносимого датчиком в структуру электромагнитного поля внутри волновода, проводилась по блок-схеме (рис.4.16), где 1 - генератор 2-см диапазона ГЗ-27, 2 - волноводная секция с двухэлектродным датчиком Холла, который размещался на стержне из пенополистирола, не вносящем заметных искажений в структуру электромагнитного поля; 3 - индикатор ЭДС Холла; 4 - поглощающая нагрузка.

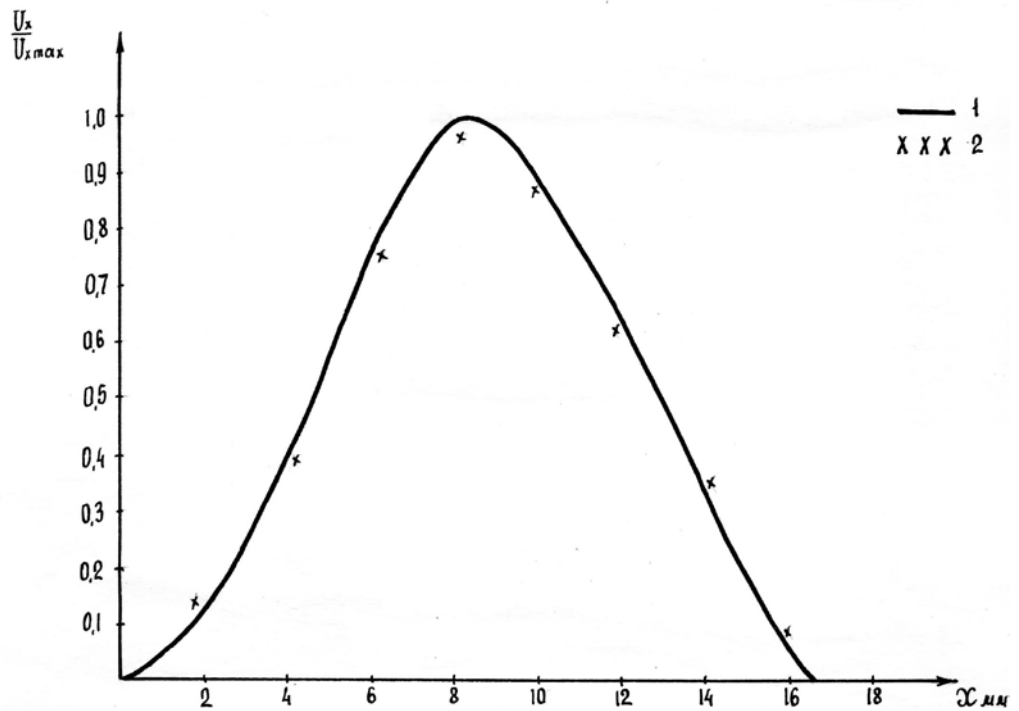


Рис. 4.17

Экспериментальное и теоретическое распределение структуры электромагнитного поля в волноводе приведено на рис.4.28, где по оси ординат откладываются отношения ЭДС Холла в какой-либо точке вдоль широкой стенки волновода к максимальному значению ЭДС, а по оси абсцисс - положение датчика в поперечном сечении волновода.

Как видно из рис.4.17, наблюдается хорошее соответствие экспериментальных точек и теоретической кривой. Это свидетельствует о пренебрежимо малых возмущениях, вносимых датчиком в исследуемое поле.

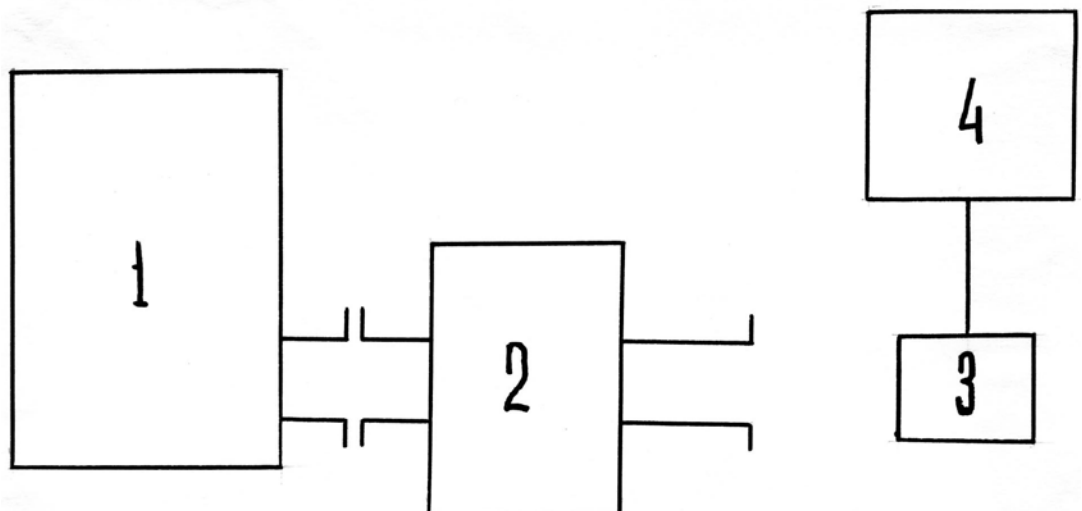


Рис. 4.18

Кроме того, исследовалось распределение поля у открытого конца волновода 2-см диапазона одним датчиком при наличии внутри волновода другого датчика, который размещался в различных фиксированных местах поперечного сечения волновода. Блок- схема измерений представлена на рис.4.18, где 1 - генератор ГЗ- 27; 2 - волноводная секция с датчиком Холла , который размещается на стержне из пенополистирола, не вносящем заметных искажений в распределение плотности потока мощности в волноводе и позволяющем перемещать датчик вдаль широкой стенки волновода с точностью до 0,1 мм; 3 - устройство с датчиком Холла (II), изготовленное из материала, не вносящего заметных искажений в распределение потока мощности и позволяющее перемещать датчик в трех взаимно-перпендикулярных направлениях; 4 - индикатор ЭДС Холла,

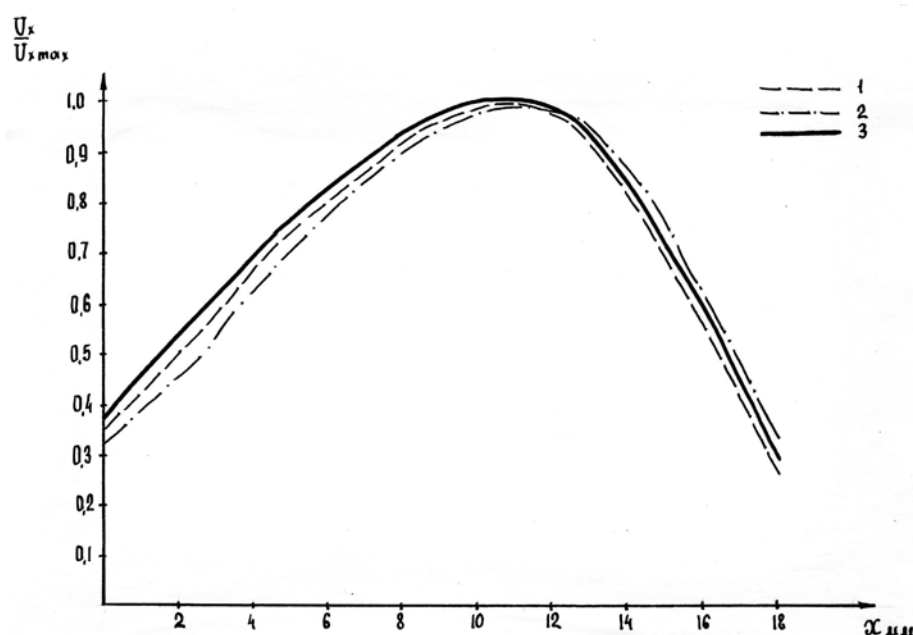


Рис. 4.19

Экспериментальные кривые распределения плотности потока мощности вблизи открытого конца волновода при наличии в нем другого датчика представлены на рис.4.19. На рисунке 4.19: 3 - кривая распределения электромагнитного поля при размещении датчика I внутри волновода у самой стенки, 2 - кривая распределения электромагнитного поля при размеще-

нии датчика I на расстоянии 4 мм от стенки; 1 - кривая, полученная при размещении I датчика на расстоянии 8 мм от стенки.

Как видно из рисунков, датчик практически не вносит искажения в распределение плотности потока мощности в волноводе.

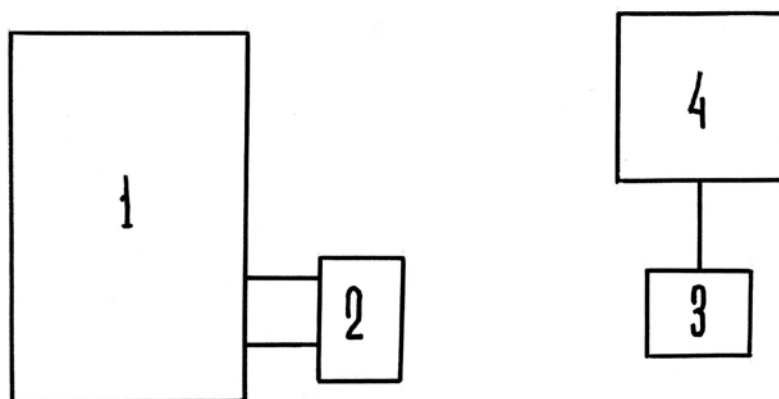


Рис. 4.20

Исследование структуры электромагнитного поля вблизи рупора проводилось по блок-схеме (рис.4.20), где 1 - генератор ГЗ-27; 2 - излучатель (рупор с максимальными размерами отверстия (23×24) мм²; 3 -устройство с датчиком Холла, аналогичное устройству (П); 4 - индикатор ЭДС Холла.

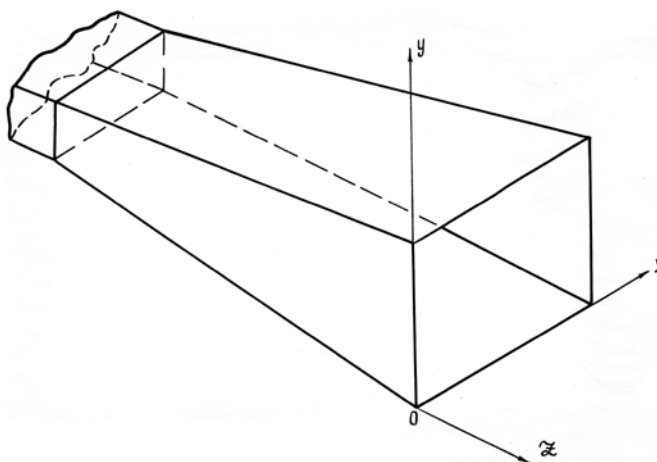


Рис. 4.21

Результаты исследований структуры электромагнитного поля в отверстии рупора при перемещении датчика Холла вдоль осей (рис. 4.21) приведены на рис. 4.22-4.24.

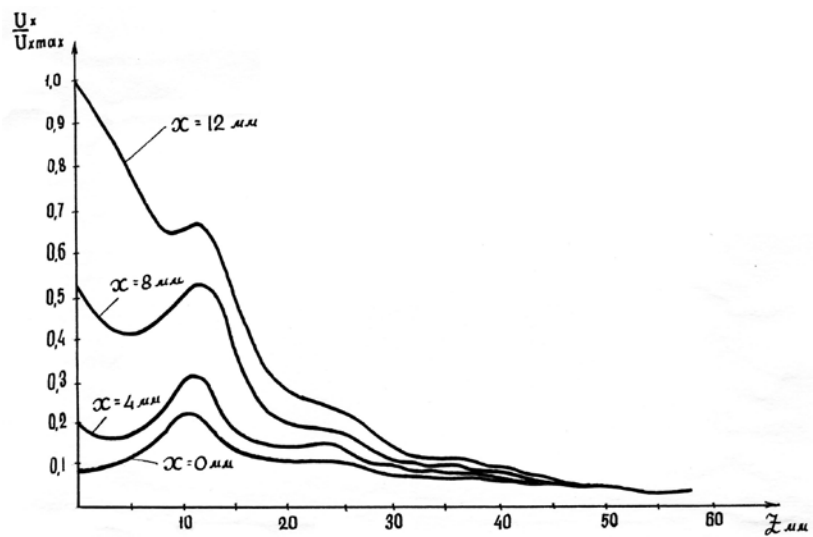


Рис. 4.22

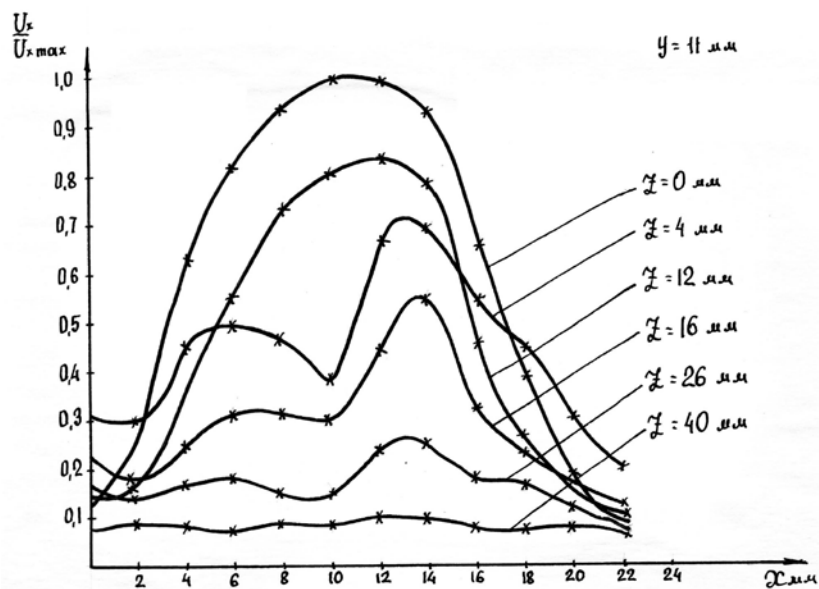


Рис. 4.23

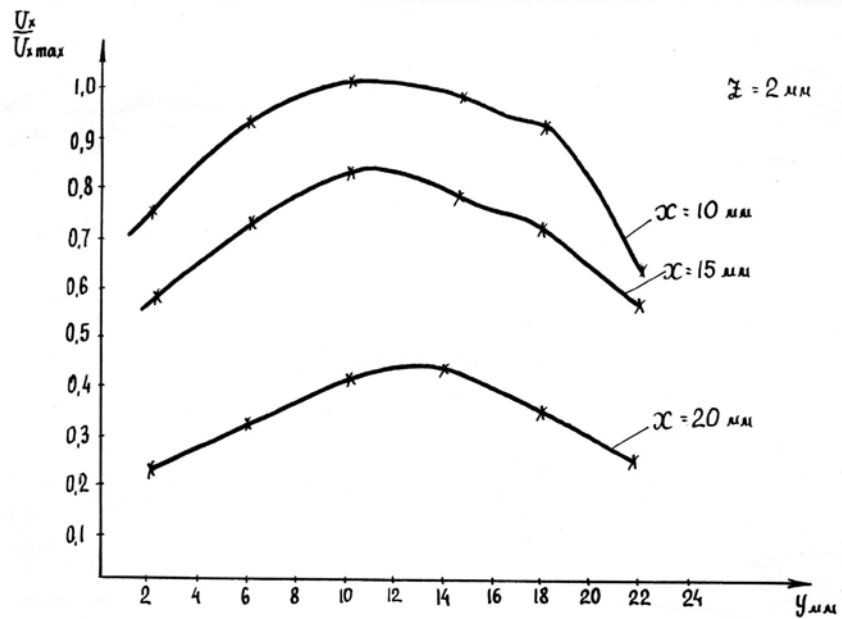


Рис. 4.24

Анализ полученных кривых свидетельствует о том, что с помощью датчиков Холла можно успешно исследовать структуру распределения плотности потока мощности электромагнитного поля СВЧ вблизи излучателя. В частности, на графиках четко выделяется ближняя зона излучателя, характеризующаяся осцилляциями плотности потока мощности и переход к дальней зоне, где плотность потока мощности монотонно убывает обратно пропорционально квадрату расстояния. Распределение плотности потока мощности в плоскости ХУ позволяет судить о постепенном формировании диаграмм направленности рупора. При этом следует иметь в виду, что на больших расстояниях от рупора, вследствие небольшого интервала изменения значения X , угловое перемещение датчика относительно рупора незначительно.

Все вышеизложенное позволяет сделать вывод, что исследование распределения плотности потока мощности СВЧ с помощью датчиков Холла является весьма эффективным и может с успехом применяться в различных областях радиофизики.

4.6 Поляриметр СВЧ диапазона.

Исследование поляризационных характеристик электромагнитного поля СВЧ диапазона важно для целого ряда практических задач, в частности, для разработки, испытания антенных систем и при применении голографических методов в технике СВЧ. Известны двухканальные поляриметры СВЧ диапазона, в которых поляризация волны анализируется по двум ортогональным компонентам, каждая из которых проходит отдельный тракт усиления и регистрации. Структурная схема двухканального поляриметра содержит поляризационный разделитель, выходные плечи которого соединены с отдельными приёмно-усилительными трактами и устройством для измерения разности фаз компонент. Фазометрическое устройство и приёмно-усилительные тракты, в свою очередь, последовательно соединены с устройством регистрации. Поляризационный разделитель разлагает высокочастотное поле с помощью двух ортогонально поляризованных, т.е. двух идентичных линейно – поляризованных в ортогональных плоскостях или поляризованных по кругу с противоположными направлениями вращения, антенн. В работах Д.Б. Канарейкина, Н.Ф.Павлова, В.А.Потехина и Д.Б. Канарейкина, В.А.Потехина, И.Ф.Шишкина описаны и многоканальные поляриметры, в которых полная информация о разности фаз компонент анализируемого поля содержится в совокупности значений амплитуд напряжений на выходе всех каналов. Структурная схема многоканального поляриметра включает поляризационный разделитель на N каналов, каждый с определённым видом поляризации, и N одинаковых каналов регистрации амплитуды, причём число каналов должно быть не менее 4. Использование в этих поляриметрах разделителей представляет определённые трудности, поскольку при практической работе с ними необходимо обеспечить наилучшее согласование всех волноводных плеч поляризационного разделителя для уменьшения ошибок в определении поляризации поля. Кроме того, приёмная часть этих поляриметров сложна и громоздка по конструкции, что также является их недостатком.

В работе Ю.В. Шубарина и А.Ф. Зоркина описан поляриметр с вращающейся антенной линейной поляризации. В качестве чувствительного элемента поляриметра используется полуволновый вибратор или рупор. Линейно-поляризованная антенна разлагает эллиптически поляризованную волну на две линейно-поляризованные компоненты и принимает лишь одну из них, а именно ту, поляризация которой совпадает с поляризацией антенны. Чувствительный элемент, т.е. линейно-поляризованная антенна, вращается вокруг направления на испытываемую и измеряется мощность в нагрузке. Полученная зависимость мощности излучения, принимаемого антенной, от углового расположения последней позволяет судить о характере поляризации электромагнитной волны. Структурная схема данного поляриметра содержит чувствительный элемент, вращающее устройство, детекторную секцию, измерительный усилитель и индикаторный прибор. Поляриметр СВЧ диапазона с вращающейся антенной линейной поляризации отличается достаточной простотой. Однако использование в качестве чувствительного элемента антенны предполагает наличие отдельного блока детекторной секции, а также электрических связей между ним и другими блоками, что усложняет конструкцию поляриметра и снижает её надёжность. Кроме того, использование антенны в качестве чувствительного элемента поляриметра позволяет исследовать поляризацию электромагнитного поля лишь определённой длины волны, на которую настроена приёмная антенна. При изменении частоты исследуемого электромагнитного поля необходима подстройка или замена антенны на другую антенну, работающую на нужной частоте, что представляет определённые трудности при работе с данным поляриметром. Более того, использование для этой цели обычных антенн СВЧ диапазона затруднено, поскольку они являются пространственно усредняющими. Это связано с размерами эффективно работающих антенн СВЧ, превышающими или, в крайнем случае, сравнимыми с длиной волны электромагнитного излучения. Значительного уменьшения размеров чувствительного элемента можно достигнуть использованием гальваномагнитных явлений, воз-

никающих при воздействии электромагнитного поля на полупроводниковые образцы. Авторы считают, что для исследования поляризационных характеристик в диапазоне СВЧ наиболее подходящим является эффект Холла[25].



Рис. 4.25

Функциональная схема (рис. 4.25) поляриметра СВЧ диапазона для исследования поляризационных параметров электромагнитного поля в качестве чувствительного элемента использует двухэлектродный датчик Холла, усилитель, индикатор ЭДС Холла и блок вращения чувствительного элемента. Электрическая схема блока вращения изображена на рис.4.26.

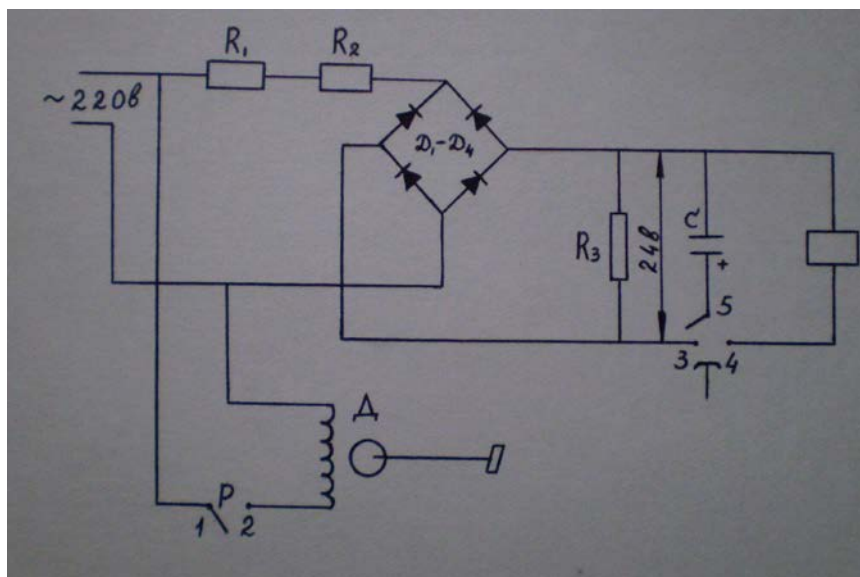


Рис. 4.26

Поляриметр СВЧ диапазона работает следующим образом. Блок вращения чувствительного элемента поворачивает датчик Холла относительно направления распространения электромагнитной волны на 360^0 с шагом 15^0 в полуавтоматическом режиме. Датчик Холла расположен на оси блока вращения таким образом, чтобы она совпадала с линией, проходящей через холловские контакты. Поскольку при распространении электромагнитной волны в свободном пространстве ортогональность компонент сохраняется, а фазовый угол между составляющими электромагнитной волны равен нулю, то соотношение между ЭДС Холла E_H и плотностью потока мощности СВЧ P в свободном пространстве имеет вид

$$U_H = kP \cos^2 \varphi, \quad (4.13)$$

где k – коэффициент пропорциональности, зависящий от физических свойств полупроводникового материала и геометрии чувствительного элемента;

φ – угол между плоскостью поляризации электромагнитной волны и плоскостью датчика Холла.

Изменение ориентации плоскости датчика Холла относительно плоскости поляризации электромагнитной волны путём его вращения при-

водит к изменению ЭДС Холла, поступающей на вход усилителя (за исключением случая волны с круговой поляризацией). Изменение ЭДС Холла регистрируется индикатором при каждом повороте датчика Холла на фиксированный угол. Экспериментальное исследование поляриметра проводилось на частотах 6; 7,5; 10; 15; 30; 37,5; 75 ГГц. Датчик Холла с линейными размерами $(4 \times 2 \times 0,15)$ мм³ размещался в свободном пространстве на расстоянии 0,2 м от выходного волновода генератора СВЧ, в котором распространялась волна H_{01} (рис. 3.8).

Ориентация датчика Холла относительно плоскости поляризации электромагнитной волны изменялась путём вращения его относительно горизонтальной оси. Значения ЭДС Холла фиксировались по индикатору при каждом повороте датчика на угол $\varphi = 15^\circ$. Поляризационные характеристики для линейно – поляризованной волны представлены на рис. 4.38, где ооо – теоретическая кривая ; ххх – экспериментальная кривая. Как видно из рис. 4.27, в правой части имеется хорошее совпадение теоретических и экспериментальных результатов. В левой части несколько хуже, что, по-видимому, связано с несовпадением оси симметрии датчика Холла с осью вращения поляриметра.

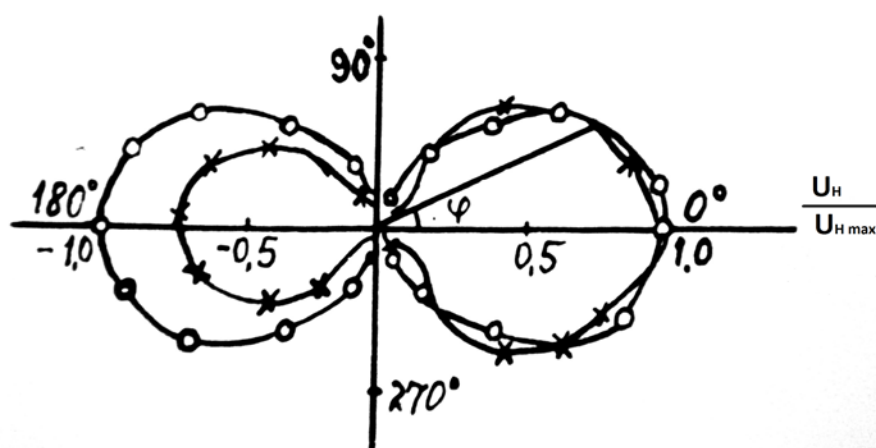


Рис. 4.27

Датчик Холла является не только чувствительным элементом поляриметра, но одновременно и измерителем плотности потока мощности СВЧ,

что позволяет упростить конструкцию за счёт замещения двух блоков поляриметра – чувствительного элемента и детектора – одним, выполняющим функции чувствительного элемента и детектора.

Поскольку двухэлектродные датчики Холла имеют широкий частотный диапазон, то их применение в качестве чувствительного элемента поляриметра СВЧ расширяет частотный диапазон последнего. Частотная зависимость чувствительного элемента поляриметра начинает проявляться лишь тогда, когда длина датчика становится больше, чем половина длины регистрируемой волны.

Чувствительный элемент поляриметра характеризуется также безинерционностью, возможностью повышения его чувствительности на два порядка при охлаждении до температуры 70...100 К, малой величиной искажения исследуемого электромагнитного поля, малым уровнем собственных шумов (порядка $10^{-17} - 10^{-19}$ Вт/Гц).

Таким образом, преимущество описываемого поляриметра СВЧ диапазона заключается в упрощении конструкции, повышении надёжности за счёт уменьшения количества блоков, а также в расширении частотного диапазона.

Глава 5. Радиовидение.

Одной из важнейших задач радиоэлектроники является создание систем, позволяющих получить информацию об образе объекта в условиях плохой видимости (туман, дождь, искусственное задымление). В этих условиях инфракрасная техника становится неэффективной и более целесообразно использовать радиосистемы, работающие в диапазоне СВЧ. В некоторых случаях (протяжённые предметы), весьма редких, задача распознавания характера объекта может быть решена с помощью обычных радиолокационных методов. Знание характера объекта особенно важно в боевых условиях для определения надводных и наземных групповых и одиночных объектов.

В таких случаях характер боевого объекта может быть определён с помощью системы радиовидения. Разумеется, что с применением таких систем не следует ожидать полного соответствия полученной информации о реальном объекте, оптической характеристике объекта. В том виде, как это принято понимать в оптике, изображение объекта в известных системах радиолокации получить невозможно. Это объясняется следующими обстоятельствами: во-первых, в радиодиапазоне при работе на одной фиксированной частоте реальный объект представляет собой некоторую совокупность вторичных отражателей, образующих пространственную диаграмму вторичного отражения с некоторым фиктивным фазовым центром. Наблюдение этого центра с помощью обычной РЛС характеризует положение объекта в пространстве. Во-вторых, из-за относительно широкой диаграммы направленности приёмной антенны, полностью перекрывающей объект, оказывается невозможным наблюдать изменение интенсивности отражённого сигнала в соответствии с шириной и формой главного лепестка диаграммы. Каждый тип наземного одиночного или группового объекта (например, танк, самолёт и др.), облучённый электромагнитной волной СВЧ, с точки зрения радиовидения можно заменить некоторой эффективной совокупностью вторичных излучателей, определённым образом расположенных в пространстве. Поэтому отражённое поле, как в непосредственной близости, так и на некотором расстоянии от объекта, будет иметь присущие данному объекту характерные признаки. Иначе говоря, электромагнитная волна, отражённая от объекта, несёт определённую информацию о характере объекта и её можно преобразовать в радио символ объекта. Получение радио символа объекта может быть осуществлено только путём анализа тонкой структуры электромагнитного поля, отражённого от объекта. Разработка системы радиовидения и её применение для обнаружения и распознавания наземных одиночных и групповых объектов найдёт широкое применение для различных целей.

5.1. Основная проблема радиовидения.

В общих случаях в качестве источников информации о характере объекта в области анализа тонкой структуры вторичного поля могут служить:

- а) распределение плотности потока мощности СВЧ;
- б) распределение фаз СВЧ поля;
- в) распределение угла поляризации поля СВЧ.

Таким образом, поле будет характеризоваться совокупностью параметров S , которую назовём радио символом объекта в области анализа

$$S = f [p(x,y,z), \varphi(x,y,z), \xi(x,y,z)],$$

где p - амплитудный компонент;

φ - фазовый компонент;

ξ - поляризационный компонент.

Поле СВЧ в области анализа может быть сформировано с помощью радио оптической системы (РОС). Для преобразования радио символа в электрический сигнал в области анализа должна располагаться индицирующая структура, преобразующая одну из компонент поля СВЧ или реагирующая на все три компонента. Индицирующая структура может быть дискретной или непрерывной. Радио символ, с помощью индицирующей структуры и связанных с ней электронных устройств, преобразуется в электрический сигнал. Воспринятый образ сравнивается оператором или специальным счётно-решающим устройством с эталонными образцами с целью установления характера объекта. Таким образом, проблема радиовидения распадается на следующие наиболее важные задачи:

- а) разработка методов построения радио символов реальных объектов при различных методах преобразования полей и оценка объёма информации, заключающегося в составных компонентах электромагнитного поля, отражённого от объекта;

б) разработка радио оптических систем с переносом структуры поля, обладающих высокой разрешающей способностью и достаточно хорошими усилительными свойствами;

в) разработка антенных устройств, облучающих объект с генератором колебаний СВЧ соответствующей мощности;

г) разработка индицирующих многоэлементных структур, преобразующих компоненты радио символа в электрические сигналы;

д) разработка электронных устройств усиления и преобразования сигналов в оконечные электрические или визуальные образы;

е) разработка методики анализа и распознавания конечных символов.

Анализ распределения потенциального компонента в некоторой ограниченной плоскости позволяет сделать заключение о форме и характере объекта. Поэтому в целях оценки информативной способности радио символа целесообразно провести исследования в следующих направлениях:

1. разработка многоэлементных индицирующих структур, преобразующих потенциальный компонент в электрический сигнал;

2. разработка электронных устройств усиления, преобразования и индикации информации в визуальный или электрический образ;

3. теоретическое и экспериментальное исследование информации, содержащейся в потенциальном компоненте для сформированных и несформированных полей, отражённых от объекта.

5.2. Блок-схема системы радиовидения.

Исходя из общих положений, характеризующих работу системы радиовидения, можно сказать, что в целом система должна состоять из устройства подсвета (передающая часть) и приёмного устройства. Передающая часть состоит из СВЧ генератора, модулятора и параболической антенны.

Наряду с общими требованиями, предъявляемому к генератору подсвета, его параметры в значительной степени определяются параметрами

приёмной индицирующей структуры. В качестве индицирующей структуры могут применяться многоэлементная структура на датчиках Холла и на болометрических датчиках. Известно, что режим работы с модуляцией генератора подсвета даёт лучшие результаты по чувствительности и помехозащищённости системы, по сравнению с режимом непрерывной генерации, поэтому основным требованием, накладывающим ограничение на параметры генератора подсвета, является инерционность индицирующей структуры. Сравнительно большая инерционность болометров ($\tau_{\max} \approx 0,01 - 0,02$ сек.) не позволяют использовать типовой режим генератора СВЧ ($\tau \approx 0,3 - 0,5$ мкс, при скважности 1000), поскольку приведённая выше инерционность не позволяет использовать частоту модуляции выше 30 Гц. Что же касается приёмной индицирующей структуры на датчиках Холла, то они практически безинерционны вплоть до сверхвысоких частот (глава 3). В этом случае частота модуляции выбирается из условия получения оптимальных характеристик последующих усилительных каналов. Приёмное устройство должно включать в себя: радио оптическую систему (РОС), приёмную индицирующую структуру и систему визуализации. Назначением радио оптической системы (РОС) является фокусирование электромагнитной энергии, отражённой от объекта, на индицирующую структуру.

Важнейшими требованиями, предъявляемыми к РОС, являются: максимально большая эффективная площадь антенны при хорошем коэффициенте использования площади её раскрытия и минимальные приёмные шумовые характеристики, обусловленные, в основном, наличием боковых лепестков диаграммы направленности антенны.

Технологические допуски на изготовление антенны, должны быть достаточно жёсткими. В основу разработки приёмного устройства могут быть положены два типа приёмных индицирующих структур: преобразователь типа „энергия СВЧ – тепловой рельеф - параметрический рельеф” – многоэлементная приёмная структура на болометрах и преобразователь типа „энергия СВЧ – потенциальный рельеф” - многоэлементная структура на

датчиках Холла. Рассмотрены три возможных типа схем визуализации – схема с параллельным переносом, схема с последовательным переносом и схема с параллельно – последовательным переносом информации. Отмечены вполне определённые преимущества последнего типа перед двумя другими.

5.3. Многоэлементная структура на датчиках Холла.

В предыдущих главах были теоретически рассмотрены и экспериментально подтверждены основные параметры двухэлектродного датчика Холла как индикатора и анализатора тонкой структуры электромагнитного поля СВЧ.

Многоэлементная структура (рис. 5.1) из двухэлектродных датчиков Холла, служащая для преобразования электромагнитного поля СВЧ в потенциальный рельеф, состоит из основания, на котором определённым образом размещаются датчики ЭДС Холла, слоя поглощающей резины и панели, которая позволяет состыковать многоэлементную структуру с коммутирующей системой.

Основание изготовлено из мелкопористого пенополистирола, который не вносил заметного нарушения в распределение электромагнитного поля СВЧ (это было экспериментально проверено). Каждому единичному датчику Холла в основании соответствует ячейка размером $(6 \times 6) \cdot \text{мм}^2$. Ячейка имеет щель, в которой укрепляется датчик, наклеенный на специальный трафарет (рис.5.2) из слюды „Мусковит“. На расстоянии 2 мм от центра щели находится отверстие диаметром 1мм для вывода электродов Холла. Электроды Холла выполняются из медной проволоки марки ПЭЛШО-0,7.

Таким образом, получается симметричная структура из двухэлектродных датчиков Холла, расстояние между центрами которых равно 6мм. Размеры кристаллических датчиков Холла $(2 \times 1 \times 0,15) \text{ мм}^3$. В слое поглощающей резины, которая находится за основанием вместе с датчиками Холла, имеются отверстия для вывода электродов датчиков Холла. Расстояние

между отверстиями и диаметр отверстий таких же величин, как и в основании.

Один из электродов каждого датчика Холла является общим и заземляется в коммутирующей системе. Нами было изготовлено несколько многоэлементных структур. Одни из них состояли из 25 датчиков Холла (5 строк и 5 столбцов), другие из 100 датчиков (10 строк и 10 столбцов). Здесь необходимо отметить, что трудность изготовления многоэлементной структуры заключается в том, что благодаря особенности возникновения эффекта Холла на СВЧ, датчики Холла располагаются не в плоскости многоэлементной структуры, а в плоскости перпендикулярной ей. В связи с этим и возникают определённые трудности. Поэтому и при изготовлении многоэлементной структуры из плёночных датчиков Холла необходимо напылять датчики по строкам (рис. 5.3), а располагать их по столбцам.

При создании многоэлементной структуры из 100 датчиков Холла панель для них состоит из 10 брусочков размерами $(100 \times 8 \times 8)$ мм³. Брусочки вырезаются из мелкопористого пенопласта, как материала, не вносящего заметных искажений в распределение плотности потока мощности электромагнитного поля СВЧ. На каждый из брусочков наклеивалось по 10 датчиков размерами $(2 \times 1 \times 0,15)$ мм³ на расстоянии 2λ между центрами датчиков. На стороне противоположной датчикам приклеивалось поглощающее покрытие. Эти брусочки вставляются в специальные пазы так, чтобы плоскость датчика была перпендикулярна плоскости преобразующего устройства. На контактной поверхности контакты распаиваются соответствующим образом. За контактной поверхностью располагаются разъёмы, от которых тянутся провода к коммутирующей системе. Для устранения наводок многоэлементная структура, контактная поверхность и разъёмы помещаются в металлический корпус. С этой же целью 101 провод от разъёмов помещаются в металлическую оплётку. Передняя часть многоэлементной структуры закрывается крышкой из фторопласта, рис 5.1.



Рис. 5.1.

Таким способом был создан многоэлементный преобразователь, служащий для преобразования СВЧ сигналов в другие сигналы, несущие в своей совокупности многоканальную информацию. Многоэлементная структура из единичных кристаллических двухэлектродных датчиков Холла представляет собой дискретный преобразователь типа „энергия СВЧ – потенциальный рельеф”.

Эта многоэлементная структура на датчиках Холла способна индцировать распределение плотности потока мощности СВЧ – диапазона и преобразовать его в совокупность сигналов, несущих многоканальную информацию.

Для экспериментального подтверждения принципиальной возможности визуальной индикации излучения СВЧ диапазона, на основе преобразователя типа «энергия СВЧ – потенциальный рельеф», был собран макет установки. Макет состоял из передающего устройства с рупорной антенной, двояковыпуклой линзы и приемного устройства на основе многоэлементной структуры. Многоэлементный преобразователь помещался в фокальной

плоскости линзы. На экране осциллографа наблюдалась дифракционная картина, соответствующая данной длине волны и диаметру линзы. С помощью аттенюатора мощность СВЧ в волноводе уменьшалась до такой величины, при которой ещё наблюдалось свечение точек на экране осциллографа. Это позволило определить чувствительность приёмо-передающей системы. Измеренная таким образом чувствительность системы оказалась равной 10^{-9} Вт/м².

Литература.

1. В.А. Антропов, Л.Х. Антропова и др. Измеритель плотности потока мощности сверхвысокой частоты. ПТЭ, 1974, № 5, с. 99-101.
2. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников, Физматгиз, 1962.
3. Harding J.W., Proc.Roy.Soc., 140A, 205 (1933).
4. Богомолов В.Н., ЖТФ, 27, 663, 1957.
5. Weiss H., Welker H., Z. Phys., 138, 322 (1957).
6. Н.И.Чистяков, В.М.Сидоров. Радиоприёмные устройства. Связь, М., 1974.
7. В.В. Галаванов, Физ. тв. Тела, 2, № 1, 62, 1960.
8. Isenberg J, Russel B.R, Greene R.F., Rev. Sei, Inst, V, 19, № 10, p.685-688, 1948.
9. Wick R. F., J.Appl.Phys. V.25, №6, p.741-756, 1954.
10. Kuhrt F., Siemens Zs, 28, 370, 1954.
11. Lippman H. I., Kuhrt F., Z.f.Naturf. V.6, B-13-A, 1958.
12. Buck T.M., the Surface Chemistry of Metals and Semiconductor, ed. Gatos H.C., Sohn, Wiley.
13. Gatos H.C., Lavine M.C., Warekois E.P., J. Elektrochem., Soc., 108, 645, 1961.
14. W.Bardsley, R.L.Bell. J. Electronics and Control, 1957, 3, p. 103-105.

15. В.А. Антропов, Л.Х.Антропова, и др. Авт. Свид. 1286001 СССР, Способ изготовления омических контактов к антимониду индия. Оpubл. в Б.И., 1987, № 1.
16. J.F.Spivak, J.Carrol, J. Appl.Phys. 36, 2321, 1965.
17. Семилетов С.А., Агаларзаде П.С. К методике получения пленок антимонида индия испарением в вакууме, Кристаллография, 1963.
18. В.Donovan. The Hall effect in metals at high frequencies, Proc. Of Phys. Soc., 68A, p. 2, №431 A,1026-1032, 1955.
19. H.M. Barlow, Proc. IRE, v. 46, №7, p.1411-1413, 1958.
20. M.Stephenson, H.E.M. Barlow, Proc. IEE, 1959, 106b, 53.
21. В.П. Жузе, А.Р. Регель, Технические применения эффекта Холла, ЛДНТП, Л.,1957.
22. Дж.А. Стрэттон, Теория электромагнетизма, М., ОГИЗ, 1948.
23. В.С.Аксенова и др. Известия ВУЗов, Радиофизика, том XIII, 1970.
24. В.А.Антропов, Л.Х.Антропова. Сб. Элементы и приборы систем измерения и управления автоматизированных производств, Пенза, 1995.
25. В.А.Антропов, Л.Х.Антропова, Т.Г.Крот. Изв. высш. учеб. заведений. Радиоэлектроника, Том 31, №8, 1988.

