

Бетко Ю. и др.
Б 2-13-7464,
С 344.19 + С 345e4
Б-542

+



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б 2-13-7464^u

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1973

Д.Бетко, И.В.Богуславский, И.Гласник, Ю.Д.Зернин,
М.Морвиц, М.Полак, Ф.Штофанек.

Б2-13-7464

с.р. 3755

ИЗМЕРЕНИЕ ВЕКТОРА МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ
ПРИ ПОМОЩИ ТРЕХ ДАТЧИКОВ ХОЛЛА.

ПОЛУЧЕНО
18 сентября 73

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Г. ВВЕДЕНИЕ.

Данная работа возникла в связи с задачей измерить вектор магнитной индукции в пузырьковой водородной камере установки "Людмила" при помощи трех датчиков Холла с точностью в определении абсолютной величины B лучшей, чем 0,1% и в определении направления \vec{B} лучшей, чем 15 минут. Следовало определить абсолютную величину и направление вектора по измерениям составляющих. Из расчетных данных магнита вытекало, что магнитное поле имеет главную Z -овую компоненту в пределах от 2,5 до 2,7 тесла, и остальные X и Y - компоненты максимально до 0,3 тесла.

Известно, что напряжение на холловских электродах датчика в первом приближении пропорционально нормальной составляющей магнитной индукции B_n , которая перпендикулярна к плоскости датчика Холла. Если расположить три датчика Холла, перпендикулярно друг к другу, можно по измерениям напряжения определить три перпендикулярных составляющих \vec{B} .

Для заданной точности измерений первое приближение не достаточно и поэтому авторы были вынуждены заняться более точным анализом этого метода.

При этом анализе точности авторы исходили из уравнения для напряжения датчика Холла, помещенного в свободно ориентированном магнитном поле. Были объяснены параметры, определяющие это напряжение и предложен способ комплексной градуировки датчиков. Приводится конструкция измерительной головки и метод для определения действительного расположения датчиков по отношению к координатной системе, связанной с этой головкой. Конкретный выбор датчиков был сделан с учетом специфических условий, в которых датчики находились при измерении, и экспериментально определенных параметров отдельных датчиков. Дается краткое описание

использованной при измерениях методики.

Приведен метод определения составляющих \vec{B} по измеренным напряжениям и его проверка измерением \vec{B} в известном магнитном поле.

1. Датчик Холла в общем магнитном поле.

Напряжения на холловских электродах датчика Холла конечных размеров в положении, показанном на рис.1 в общем магнитном поле при выполнении определенных условий 1/, 2/ можно выразить как

$$U_{34} = U_T + \int_0^b [\rho_0 + \Delta \rho_{\perp}(B)(1 - \sin^2 \psi_B \cos^2 \psi_B)] i_x dx + \\ + \int_0^b [\rho_0 + \Delta \rho_{\perp}(B)(1 - \sin^2 \psi_B \sin^2 \psi_B)] i_y dy + \\ + \int_0^b R_H B \cos \psi_B i_x dy - \int_0^b \Delta \rho_{\perp}(B) \sin^2 \psi_B \sin \psi_B \cos \psi_B i_x dy \quad (I)$$

где U_T - термонапряжение; ρ_0 - удельное сопротивление материала датчика в нулевом магнитном поле; $\Delta \rho_{\perp}(B)$ - изменение удельного сопротивления в поперечном магнитном поле \vec{B} ; ψ_B - сферические координаты вектора магнитной индукции; i_x, i_y - плотность тока в направлении X и Y соответственно; R_H - постоянная Холла.

Последние два интеграла в уравнении (I) можно в однородном поле \vec{B} проинтегрировать 1, 2/:

$$\int_0^b R_H B \cos \psi_B i_x dy = R_H \frac{I}{d} B_n = U_H \quad (2)$$

$$\int_0^b \Delta \rho_{\perp}(B) \sin^2 \psi_B \cos \psi_B i_x dy = \quad (3)$$

$$= \frac{R_p I}{2 \cdot d} B^2 \sin^2 \psi_B \sin 2 \psi_B = U_p$$

где I - ток питания; d - толщина датчика Холла;

R_p - постоянная планарного эффекта Холла;

U_n - нормальное Холловское напряжение;

U_p - планарное Холловское напряжение.

Вычисление остальных интегралов очень сложно и поэтому обыкновенно они определяются экспериментально. Для определения составляющей V_n используется в основном 4-ый член в /I/, т.е. нормальное Холловское напряжение, а остальные члены уравнения (I) являются помехами, влияющими на точность определения этой составляющей. Поэтому в дальнейшем мы дополнительно проанализируем все эти члены уравнения (I).

Первый член, термонапряжение U_T , может возникать в результате неравномерного теплоотвода из датчика при больших токовых нагрузках. Его знак не зависит от направления тока, поэтому можно U_T определить как $U_T = \frac{U_{34}(I+) + U_{34}(I-)}{2}$. Выбором подходящего тока питания и обеспечением хорошего отвода тепла возможно U_T почти совсем исключить.

Второй член представляет падение напряжения, возникающее из-за геометрического сдвига холловских электродов 3 и 4 в направлении оси X . Величина этого напряжения определяется расстоянием X_0 , удельным сопротивлением ρ_0 , её изменением в магнитном поле и плотностью тока i_x на грани $Y=0$. Этот член очень мало зависит от полярности \vec{B} , но зависит от полярности тока питания.

Третий член представляет вклад от компоненты плотности тока i_y , которая в датчике возникает по двум причинам. В нулевом магнитном поле она возникает из-за геометрии датчика и неоднородностей материала. Эту часть обозначим i_{yg} . Она

практически не зависит от полярности \vec{B} , но её вклад в U_{34} зависит от $|B|$ и углов ψ_B , а ψ_B^u точно также, как и вклад второго члена из-за магнитосопротивления.

Кроме i_{YD} в магнитном поле возникает в следствии конечных размеров датчика и его электродов еще компонента которая зависит от размеров датчика, величины, полярности и направления \vec{B} . Влияние компоненты i_{YD} до сих пор не было хорошо изучено.

Зато влияние компоненты i_{YB} на U_{34} в магнитном поле с $B_p = 0$ было теоретически и экспериментально хорошо изучено /6,10/ для прямоугольных датчиков и выражено с помощью так называемого геометрического фактора G следующим образом:

$$U_{34} = \frac{R_H \cdot I \cdot B}{d} \cdot G$$

фактор G , который меньше 1, зависит от отношения $\frac{a}{b}$, длины к ширине датчика и размеров Холловских электродов или от отношения a/a' (см. рис.3) для крестовой формы датчиков. С нарастающим \vec{B} он нарастает и при больших полях ($\mu B \gg I$) достигает единицы. Для датчиков с отношением $a/b = 5$ он в нулевом поле равен 0,99.

Зависимость G - фактора от планарной компоненты B_p изучал Тюрк /7/, который показал, что B_p понижает G

Для того, чтобы подавить влияние компоненты i_{YB} на U_{34} подобрана такая геометрия датчиков, у которой уже в нулевом поле G очень близко к 1 ($G > 0,97$).

Четвертый член уравнения (I) - это Холловское напряжение. Его величина пропорциональна B_n , постоянной Холла R_H и току питания.

Пятый член уравнения (I) - это напряжение от планарного эффекта Холла, вызванного планарной компонентой V_p . Его величина определяется изменением сопротивления в поперечном магнитном поле и произведением $\sin^2 \varphi_B \sin \varphi'_B \cos \varphi_B$

При измерениях, в которых пренебрегают влиянием V_p на U_{34} , V_n определяется из калибровочной кривой $U_{34} = f(V_n)$ измеренной в магнитном поле перпендикулярном к плоскости датчика. В этой калибровочной кривой включен и вклад первых трех членов уравнения (I) от компоненты \vec{V} и поэтому измерение \vec{V} в перпендикулярном магнитном поле можно произвести с той же точностью, что и калибровку, если условия при измерении и калибровке одинаковые.

Из уравнения (I) видно, что влиянием V_p можно пренебречь только в случае, когда φ_B практически равен нулю, т.е. когда можно пренебречь членами, пропорциональными $\sin^2 \varphi_B$. Однако в общем случае U_{34} является функцией не только V_n , но и планарной компоненты V_p и углов φ_B и φ'_B . Это значит, что U_{34} является функцией трех независимых переменных V , φ_B и φ'_B .

Для полного описания датчика Холла в свободно ориентированном магнитном поле его нужно калибровать как функцию этих трех независимых переменных. Эту калибровку назовем комплексной калибровкой датчика.

Собственное определение вектора \vec{V} по измеренным напряжениям U_{34x} , U_{34y} , U_{34z} , трех перпендикулярно расположенных друг к другу датчиков Холла, хотя и комплексно проградуированных, не является тривиальной задачей из-за того, что соотношения между U_{34x} , U_{34y} , U_{34z} и \vec{V} , φ_B и φ'_B нелинейны.

Одним из методов решения этой задачи является метод постепенных приближений, основанный на том, что в первом приближении B_{x1} , B_{y1} , и B_{z1} определяются из измеренных напряжений U_{3yx} , U_{3yy} и U_{3yz} с помощью калибровочных кривых, полученных в перпендикулярном магнитном поле. Второе приближение B_{x2} , B_{y2} и B_{z2} определяется из измеренных напряжений U_{3yx} , U_{3yy} , U_{3yz} с помощью комплексных калибровочных кривых в предположении, что планарные компоненты \vec{B} определены первым приближением.

2. Комплексная градуировка датчиков Холла.

В этом разделе покажем, что для измерения составляющих \vec{B} было достаточно провести градуировки в двух положениях датчика:

- а) нормальное положение - вектор магнитной индукции перпендикулярен плоскости датчика Холла ($\psi_B = 0$);
- б) планарное положение - вектор \vec{B} действует в плоскости датчика Холла ($\psi_B = 90^\circ$).

Нормальное положение - это обычная градуировка. В этом случае не мешают 1, 2 и 3 члены уравнения (I), так как они включены в градуировочные кривые. Влияние угла ψ_B учитывать не нужно, потому, что если $\psi_B < 1^\circ$, планарная составляющая вызывает ошибку $< 2 \cdot 10^{-4}$.

Градуировка датчиков для измерения B_x , B_y в магните камеры сделана в полях от - 0,3 до + 0,3 тесла при токе 50 ма. Датчики для измерения B_z были проградуированы в полях от 0,86 до 2,85 тесла в обоих направлениях \vec{B} . У всех измеряемых датчиков градуировочную кривую можно сыло выразить аналитически уравнением:

$$U = K + K B_n$$

(10)

где K_0 - постоянная, K - чувствительность датчика Холла.

В приведенном диапазоне это выражение совпадало с измеренной градуировочной кривой с точностью $\pm 10^{-3}$ тесла для датчиков V_x, V_y и $\pm 10^{-4}$ тесла для датчиков V_z , что соответствует требуемой точности определения \vec{B} .

Эта линейная зависимость $U_{34} = f(V_n)$ свидетельствует о том, что постоянная Холла R_H у наших датчиков не зависит от V_n , что $\Delta R_L(B)$ особенно в больших магнитных полях, является линейной функцией \vec{B} и что компонента i_y в центральной части датчика не зависит от \vec{B} .

При градуировке в планарном положении датчики поворачивались в плоскости параллельной направлению \vec{B} вокруг оси, перпендикулярной к этой плоскости и измерялось $U_{34} = f(\varphi_B)$. В этом случае оказалось, что напряжение U_{34} можно достаточно точно выразить через первые три члена ряда (фурье - нулевой, первой и второй гармоник, т.е. в форме:

$$U_{34} = A_0(B_p) + A_1(B_p) \sin(\varphi_B + \varphi_1) + A_2(B_p) \sin 2(\varphi_B + \varphi_2) \quad (8)$$

где φ_1 - фазовый сдвиг первой гармоники и φ_2 - фазовый сдвиг второй гармоники относительно начального положения. При этом начальное положение такое, что продольная грань керамики датчика параллельна с вектором \vec{B} ($\varphi = 0$).

Нулевая гармоника определена средней величиной второго и третьего членов уравнения (I), слабой составляющей нормального напряжения Холла вследствие того, что ось вращения не является точно перпендикулярной к \vec{B} . Для того, чтобы исключить влияние напряжения Холла, нулевую гармонику второго и третьего членов уравнения (I) мы определили следующим образом. Датчики для изме-

рения B_x и B_y поместили в планарное положение с $\varphi = -\varphi_2$ и измеряли $U_{3\varphi+}$ и $U_{3\varphi-}$ при обеих полярностях \vec{B} , из которых нулевая гармоника определялась так:

$$A'_0 = \frac{U_{3\varphi+} + U_{3\varphi-}}{2} \quad (9)$$

В этом положении вторая гармоника равна нулю. Первая гармоника и часть нулевой, соответствующие нормальному напряжению Холла, из-за изменения знака при изменении знака B_z не вносят вклад в выражение (9). Таким образом, мы определили, что A'_0 в зависимости от B_z можно выразить как

$$A'_0 = k_0 + k_1 |B| \quad (9a)$$

Первая гармоника возникает под влиянием слабой составляющей нормального напряжения Холла, так как ось вращения датчика не была идеально перпендикулярна к плоскости датчика.

Вторая гармоника возникает прежде всего из-за пятого члена (I), т.е. планарного Холловского напряжения. Члены второй и третий тоже вносят в $A_2(B)$ определенную часть через $\sin^2 \varphi_B$. Вторую гармонику можно выразить как

$$A_2(B) = k_2 B^2 \quad (10)$$

Измеренные величины U_T , k_0 , k , k_0 , k_1 , k_2 приведены в таблице I. Законность такого подхода при градуировке вытекает из следующего:

а) при измерении составляющей B_z , абсолютная величина которой находится в диапазоне 2,5 + 2,7 тесла планарные составляющие B_x и B_y меньше 0,3 тесла, т.е. $\sin \varphi_B < 0,15$.

В этом случае вклад от планарных составляющих в нулевую гармонику напряжения U_{3y} от второго и третьего членов уравнения (I) по сравнению с вкладом от составляющей V_z приблизительно на 2 порядка меньше.

Но поскольку даже вклад от составляющей V_z во второй и третий члены (I) порядка 10^{-3} от полного напряжения Холла ясно, что влиянием планарных составляющих на нулевую гармонику при измерении V_z можно пренебречь.

Влияние планарных составляющих на вторую гармонику у датчика измеряющего V_z на основе упрощенной градуировки, точно определить нельзя. Однако на основе уравнения (I) и измерений в планарном положении можно сделать оценку этого влияния.

Из уравнения (I) следует, что вторая гармоника от второго, третьего и пятого членов пропорциональна $\sin^2 \psi_B$. Из измерений, сделанных в планарном положении ($\sin \psi_B = 1$), экспериментально определено, что амплитуда второй гармоники A_2 у датчиков для измерения V_z меньше, чем $3 \cdot 10^{-3}$ Холловского напряжения в том же поле, но в нормальном положении ($k_2/k \leq 3 \cdot 10^{-3}$). Из выше приведенного вытекает, что вторая гармоника, вызванная планарными составляющими V_x, V_y приведет в определении V_z из градуировочной кривой (измеренной в нормальном положении), к относительной ошибке порядка 10^{-5} , чем ввиду требуемой точности, можно пренебречь;

б) при определении влияния ошибок в измерении V_x и V_y на общую точность измерения надо учесть, что эти составляющие представляют собой в данном случае максимально 12% из величины V_z и поэтому их вклад в общее \vec{V} возможно выразить следующим образом:

$$V = V_z \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{V_x^2 + V_y^2}{V_z^2} \right) + \frac{V_x \Delta V_x + V_y \Delta V_y}{V_z^2} \right\} \quad (II)$$

Видно, что этот вклад в \vec{B} представляет максимально $\approx 1\%$ и относительная ошибка, которую в определении абсолютной величины \vec{B} вызывают ошибки ΔV_x и ΔV_y меньше, чем

$$0,12 \frac{\Delta V_x + \Delta V_y}{B_z} \quad (12)$$

Если составляющие V_x и V_y определить с ошибкой меньше, чем 1% , то ошибка в определении абсолютной величины \vec{B} вызванная ошибками в V_x и V_y будет порядка $0,01\%$ и в определении направления \vec{B} меньше, чем $\operatorname{arctg} (2 \cdot 10^{-3}) = 7'$.

При оценке ошибки измерения составляющих V_x и V_y , вызванной планарной составляющей, сделаем подобное рассуждение как при оценке ошибки в измерении V_z .

В этом случае планарная составляющая V_p практически равна абсолютной величине B , т.е. $\sin \varphi_B = 1$ и её вклад в U_{34} можно оценить из градуировки в планарном положении ($\sin \varphi_B = 1$).

Нулевую гармонику можно выразить при помощи уравнения (9), где вместо V_p будем писать V_{z1} .

Чтобы понизить влияние второй гармоники, датчики для измерения V_x и V_y крепились на измерительную головку таким образом, чтобы обеспечить параллельность оси z и прямой $\varphi = -\varphi_2$ на датчике. При этом:

$$\sin 2(\varphi_{Bx} + \varphi_{2x}) = \sin 2(\operatorname{arctg} \frac{V_y}{V_{z1}})$$

и

$$\sin 2(\varphi_{By} + \varphi_{2y}) = \sin 2(\operatorname{arctg} \frac{V_x}{V_{z1}})$$

Из уравнения (8) вклад от планарной составляющей в U_{34x} будет:

$$\sin 2(\arctg \frac{B_y}{B_{z1}}) \cdot k_2 |B_{z1}|$$

Для определения второго приближения составляющей B_x , учитывающего влияние планарной составляющей B_p будем исходить из выражения:

$$U_{34x} = K_0 + K B_{x2} + k_0 + k_1 |B_{z1}| + \sin 2(\arctg \frac{B_{y1}}{B_{z1}}) \cdot k_2 |B_{z1}| \quad (13)$$

из которого для B_{x2} получаем:

$$B_{x2} = \frac{U_{34x}}{K} - \frac{K_0 + k_0 + k_1 |B_{z1}| + \sin 2(\arctg \frac{B_{y1}}{B_{z1}}) \cdot k_2 |B_{z1}|}{K} \quad (13a)$$

Составляющую B_{y2} получим из аналогичного выражения.

Ввиду того, что член $\frac{\sin 2(\arctg \frac{B_{y1}}{B_{z1}}) \cdot k_2 |B_{z1}|}{K}$ был у всех датчиков меньше, чем 0,006 тесла и тоже с учетом выражения (12) и действительных величин B , можно этой коррекцией в окончательной обработке наших измерений пренебречь, поскольку она меньше, чем 0,03%.

При этой оценке ошибок мы не учитывали влияние нормальной компоненты B_x или B_y на величины нулевой и второй гармоник от планарной компоненты B_p вызванными 2.3. и 5 членами в уравнении (I) и предполагалось, что параметры K_0 и K по сравнению с градуировкой в нормальном положении в полях $-0,3 + + 0,3$ тесла не изменяются.

3. Датчики Холла - их технологии и свойства.

Чтобы измерять карту магнитного поля с требуемой точностью, нужно было изготовить специальные датчики Холла, с следующими параметрами:

а) вольтовая чувствительность $K = \frac{U_{34}}{B}$ при номинальном токе питания должна быть порядка 10 мВ/тесла в связи с чувствительностью 1 микровольт цифрового вольтметра, измеряющего напряжения U_{34} ;

б) температурный коэффициент напряжения Холла α_H должен быть в области $25 \pm 10^\circ\text{C}$ меньше 0,02% / $^\circ\text{C}$ у датчиков, измеряющих компоненты B_x и B_y и меньше 0,01% / $^\circ\text{C}$ у остальных датчиков;

в) эффективная площадь датчика должна быть равна или меньше 1 мм², для того, чтобы подавить влияние ожидаемых градиентов магнитного поля;

г) конструкция датчика должна обеспечить фактор $G \geq 0,97$ и угол α между плоскостью полупроводниковой пластинки и плоскостью подложки, которой прижимается датчик на измерительную головку меньше 10'.

На основе нашего опыта [3,4], так и измерений, проведенных в рамках этой работы мы пришли к заключению, что датчики Холла требуемых параметров можно изготовить из $\Gamma_n \text{ Sb}$ с концентрацией примесей донорного типа порядка $10^{17} + 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Преимуществом этого материала прежде всего является малая зависимость постоянной Холла от температуры и магнитного поля. Температурную зависимость концентрации электронов n у полупроводника с преобладающей концентрацией доноров N_D можно выразить уравнением:

$$n = \frac{N_D}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{N_D^2 + 4 n_i^2} \quad (15)$$

где n_i - собственная концентрация носителей заряда;
 N_D - концентрация доноров.

По данным /5/ для $In Sb$ n_i определяется формулой

$$n_i = 5,7 \cdot 10^{14} T^{3/2} e^{-\frac{1450}{T}} \quad (16)$$

Используя уравнения (15) и (16) и соотношение между R_H и n для нашего случая

$$R_H = -\frac{1}{en} \quad (17)$$

можно в требуемой области температур (25 ± 10)°C ($288^{\circ}K + 308^{\circ}K$) приблизительно определить температурный коэффициент напряжения Холла как функцию N_D (смотри таблицу 2).

Таблица 2.

N_D	$2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$	$5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$	$7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$	10^{18} см^{-3}
$\alpha_H \% / ^{\circ}K$	-0,128	-0,023	-0,012	-0,006

Видно, что α_H материалов с концентрацией доноров больше, чем $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ очень малы.

Чтобы датчики из материала с большой концентрацией электронов обладали тоже достаточной вольтовой чувствительностью, необходимо уменьшить толщину полупроводниковой пластинки. Чувствительность в зависимости от концентрации примесей для датчиков с толщиной 100, 50 и 30 микрометров изображено на рис.2, предполагается ток питания $I = 100 \text{ ма}$. Видно, что датчик с толщиной

50 мкм из материала с $N_D = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ имеет $K = 12,5$ мв/тесла, что удовлетворяет нашим требованиям. Толщины 50 мкм, как показал наш опыт, можно добиться без особых затруднений.

Были выбраны датчики Холла из материала $n\text{-InSb}$ с концентрацией $N_D \approx (8+10) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ с толщиной $d \approx 50$ мкм, удовлетворяющие требованиям а) и б), сформулированным в начале этой главы. Для того, чтобы сделать датчики с высоким фактором G и с малой эффективной площадью (требования в) и г), мы решили пользоваться техникой фотолитографии.

При этом мы изучили датчики двух форм - датчики крестовой формы и датчики прямоугольной формы с рукавами. Датчики крестовой формы (рис.3) по данным /6/ должны обладать очень хорошей линейностью характеристики $U_{34} = f(B_n)$ в нормальном положении ($G > 0,97$).

С другой стороны, плотность тока в центральной части датчика этой формы имеет компоненту $i_{y\delta}$, что по уравнению (I) и данным работы /7/ могло бы увеличить влияние планарной компоненты V_p на U_{34} и затруднить измерение скалярных векторов магнитной индукции. По этой причине мы решили приготовить и датчики прямоугольной формы с рукавами (рис.4) для припайки Холловских контактов и контактов для питания датчика. Из-за того, что электроды Холловских контактов, удаленные от центральной части датчика и что электроды питания расположены на большом расстоянии по сравнению с шириной датчика (эффективное отношение $a/b > 4$) и не закорачивают Холловское поле по всей ширине датчика, то компоненты $i_{y\delta}$ и i_{yB} плотности тока в центральной части должны быть малы, а следовательно и их влияние на U_{34} в присутствии планарной компоненты V_p мало.

Керамическая подложка размеров $5 \times 10 \text{ мм}^2$ была плоско-параллельна шлифована на толщину $\approx 400 \text{ мкм}$. Максимальная разница в толщине пластинки $\pm 10 \text{ мкм}$. На подложке была приклеена специальной эпоксидной смолой пластинка полупроводника с размерами $4 \times 4 \times 0,3 \text{ мм}^3$. Толщина слоя смолы была менее 1 мкм . Шлифованием и полированием толщина пластинки полупроводника была уменьшена до $(40-60) \text{ мкм}$. При помощи фотолитографической техники из этой пластинки была вытравлена требуемая форма. После очистки поверхности датчика, на конце креста или рукава датчика припаиваются изолированные медные проволоки диаметром 100 мкм . Во время припаивания нужно стремиться, чтобы соотношение размеров a/a' было $1,2$ (см. рис.3), что является важным с точки зрения хорошей линейности характеристики $U_{34} = f(B) / 6/$. С целью уменьшить индуцированные напряжения, пары Холловских и токовых проводов скручиваются. После этого на датчики сверху приклеивается керамическая пластинка.

Датчики в этом оформлении могут работать при максимальной температуре 100°C . Реальные формы датчиков представлены на рис. 5 и 6.

Параметры описанных типов датчиков Холла собраны в таблице I.

4. Измерительная головка.

Измерительная головка имеет форму кубика из латуни с размерами $3 \times 3 \times 3 \text{ см}$, на который прижаты датчики Холла с помощью паралона и пружины. Кубик представляет собой координационную систему, относительно которой измерялись отдельные составляющие B . Параллельность и перпендикулярность отдельных плоскостей

кубика выдержана с точностью $1,5'$.

Все три датчика Холла помещены вблизи одной вершины, чтобы находиться по возможности в одном и том же магнитном поле. Для измерения V_x и V_y датчики расположены таким образом, чтобы их оси $\varphi_1 = -\varphi_2$ были параллельны с осью Z (рис. 7). На плоскость, на которой находится датчик, наклеена флешка с проводами для припаивания токовых и Холловских контактов. Вид кубика изображен на рис. 8.

Отклонение плоскости датчиков Холла, измеряющих V_x , V_y от оси Z , определено из измерения U_{34} в поле \vec{B} , приблизительно параллельном с осью Z при обеих полярностях магнитного поля в двух положениях датчика, взаимно повернутых на 180° вокруг оси Z . Таким образом, получились четыре величины напряжений $U_{34}(+B)\varphi$; $U_{34}(-B)\varphi$; $U_{34}(+B)\varphi+180^\circ$; $U_{34}(-B)\varphi+180^\circ$ из которых отклонение α_{xz} плоскости датчика Холла, измеряющего V_x от оси Z , определилось по формуле [8]:

$$\alpha_{xz} = \frac{U_{34}(+B)\varphi - U_{34}(-B)\varphi + U_{34}(+B)\varphi+180^\circ - U_{34}(-B)\varphi+180^\circ}{4KB} \quad (14)$$

при чем предполагалось $\cos \varphi_2 = 1$ и $\alpha_{xz} < 5^\circ$. Тогда

$$\sin \alpha_{xz} = \alpha_{xz}$$

Фазовые сдвиги φ_2 и отклонения датчиков Холла α_{xz} и α_{yz} от оси Z приведены в таблице I. Величины α_{xz} и α_{yz} были меньше, чем $30'$.

Углы α_{xy} и α_{yx} примерно той же величины, что и α_{xz} , α_{yz} , но так как V_x и V_y на порядок меньше V_z , ошибки, вносимые в измерение \vec{B} , неточностями в углах α_{xy} и α_{yx} , гораздо меньше. В данной работе они не учитывались.

На основе результатов градуировки и измерений φ_z , α_{xz} и α_{yz} были выбраны датчики для измерения составляющих B_x , B_y и B_z . При выборе учитывались величины K_0 , K и соотношение k_z/K , исходя из следующих обстоятельств:

Чтобы измерять на том же самом диапазоне цифрового вольтметра, для измерения B_z надо использовать менее чувствительные датчики. У них одновременно меньше температурная зависимость, $\alpha_H \leq 0,01\% / ^\circ\text{C}$. Соотношение k_z/K у всех этих датчиков $< 3,4 \cdot 10^{-3}$ и чувствительность $K = (5-10)$ мВ/тесла при токе 50 мА

Датчики для измерений B_x и B_y имели большую чувствительность $K = (20-50)$ мВ/тесла и соотношение $k_z/K \leq 10^{-2}$. Температурный коэффициент у этих датчиков $\alpha_H \leq 0,01\% / ^\circ\text{C}$. Изменение температуры на $\pm 5^\circ\text{C}$ /12/ приводит к ошибке, меньшей 0,01% в измерении \vec{B} .

5. Источник стабилизированного тока для питания датчиков.

Для понижения ошибок измерения, вызванных изменением сопротивления токовых цепей датчиков под влиянием магнитного поля и изменения температуры, а также для исключения необходимости подстройки тока питания датчиков во время измерений, был изготовлен стабилизированный источник тока.

Источник построен по схеме перевода стабильного опорного напряжения на нужный ток при помощи усилителя постоянного тока с глубокой отрицательной токовой последовательной связью (рис.9). Цепи системы на рис.9 были рассчитаны и построены, исходя из следующих исходных требований на параметры источника:

- а) номинальная нагрузка - $5 + 200 \Omega$
- б) температурный диапазон окружающей среды - $15 + 35^\circ\text{C}$ ($\Delta T = 20^\circ\text{C}$)
- в) питание источника - сеть $220 \pm 10\%$, 50 Нз
- г) допустимые относительные изменения $|\delta I_H|$ номинального тока $I_H = 100 (50) \text{ ма}$ при условиях а), б), в) должно быть $\leq 10^{-4}$

Работу системы, приведенной на рис.9, можно описать следующим образом:

$$I_H = U_{0H} \cdot S_K \quad (18)$$

где S_K - коэффициент передачи конвертора $U_{0H} - I_H$

Если параметры источника U_{0H} и конвертора взаимно независимы, то относительные изменения величины тока в нагрузке, опорного напряжения и коэффициента передачи связаны отношением:

$$\frac{\Delta I_H}{I_H} = \frac{\Delta U_{0H}}{U_{0H}} + \frac{\Delta S_K}{S_K} \quad (19)$$

Для обеспечения требуемой стабильности тока необходимо выполнение неравенства:

$$|\delta I_H| \geq \left| \frac{\Delta U_{0H}}{U_{0H}} \right| + \left| \frac{\Delta S_K}{S_K} \right| \quad (20)$$

Из (20) однозначно вытекает необходимость выполнения неравенств

$$k \cdot |\delta I_H| > \left| \frac{\Delta U_{0H}}{U_{0H}} \right| \quad (20a)$$

$$(1-k) \cdot |\delta I_H| > \left| \frac{\Delta S_K}{S_K} \right| \quad (20б)$$

где $k < 1$.

Из (20а) и (20б) следует, что для обеспечения требуемой стабильности тока в заданных условиях необходимо обеспечить высокую стабильность опорного напряжения и коэффициента передачи конвертора.

Принципиальная схема, которая полностью позволила выполнить указанные требования, приведена на рис.10.

Опорное напряжение получается путем двух-каскадной стабилизации выпрямленного и до определенной степени выглаженного напряжения. Первый каскад стабилизации - транзисторный стабилизатор последовательного типа (транзисторы T_1, T_2) с коэффициентом стабилизации около 10^{-4} с температурным коэффициентом порядка 10^{-5} $1/^\circ\text{C}$. Второй каскад - составной температурно-компенсированный зенеровский диод (D_4) типа КЗ 82 (фирмы ТЕСЛА) с динамическим сопротивлением $< 15 \Omega$ и с температурным коэффициентом в диапазоне $0 + 50^\circ\text{C}$ лучшим, чем 10^{-6} $1/^\circ\text{C}$. Этот диод питается от первого каскада через сопротивление R_{Σ} , выполненное из манганиновой проволоки. Коэффициент стабилизации второго каскада ≈ 6 . В результате получается, что при изменении температуры окружающей среды от 15 до 35°C и при изменении напряжения сети на $\pm 10\%$ относительное изменение опорного напряжения не превышает $0,5 \cdot 10^{-4}$ и относительный уровень остаточной переменной составляющей $< 10^{-5}$.

Усилитель, выполняющий функцию конвертора, состоит из операционного интегрального усилителя с дифференциальным входом типа IUT401A и выходного каскада из кремниевого мощного транзистора T_3 типа КИ602. Нагрузка и образцовое сопротивление для точного измерения тока включены в коллекторную цепь этого транзистора, сопротивление обратной связи, которое выполнено из ман-

ганина, в его эмитторную цепь. Операционный усилитель питается номинальным напряжением 12,6 в из первого каскада стабилизатора. Опорное напряжение 6,3 в из делителя R_8, R_9 , который выполнен из манганиновых сопротивлений, подается на неинвертирующий вход операционного усилителя. Напряжение обратной связи из эмиттерного сопротивления выходного транзистора подается непосредственно на инвертирующий вход операционного усилителя. R_{oc} может в небольших пределах (примерно $\pm 5\%$) подстраиваться, что необходимо для настройки точного значения номинального тока. В случае надобности получить другое значение тока (допустим 50 или 150 ма) нужно выбрать другое номинальное значение R_{oc} . Надлежащий выбор и включение элементов усилителя позволили получить следующие параметры:

коэффициент передачи $S_k = \frac{1}{R_{oc}}$

$$\frac{\Delta S_k}{S_k}(\Delta T, \Delta U_{пит}, t) < 0,25 \cdot 10^{-4}$$

Выходное внутреннее динамическое сопротивление $> 3 \text{ M}\Omega$,

Источник выдерживает длительное короткое замыкание выходных клемм при номинальном значении тока до 200 ма, и при предполагаемом максимальном значении сопротивления нагрузки 250 ом может давать ток до 150 ма. При меньших значениях тока максимальное значение сопротивления нагрузки может соответственно возрастать.

6. Методика обработки результатов измерения в координационной системе измерительной головки и проверка точности измерения.

Из измерения на одной головке получаются три напряжения

U_{34x} , U_{34y} и U_{34z} , из которых надо определить состав-

ляющие V_x , V_y и V_z . Прежде всего обсудим определение составляющей V_z , которая в нашем случае самая большая и точность определения \vec{V} зависит, главным образом, от точности определения этой составляющей. Как выше сказано для нее возможно написать:

$$V_{z1} = \frac{U_{34z} - K_{0z}}{K_z} \quad (21)$$

потому что избраны датчики, у которых $k_{zz}/K_z \leq 3,4 \cdot 10^{-3}$ и отклонение нормали к плоскости датчика Холла, измеряющего V_z от оси z у всех головок $< 0,5^\circ$. Уравнение (18) получается из градуировки в нормальном положении.

Составляющие V_x и V_y определятся по измеренным напряжениям U_{34x} и U_{34y} , для которых с учетом поправки на отклонение плоскости датчика от оси z и планарной составляющей V_p во втором приближении можно писать

$$V_{xz} = \frac{U_{34x}}{K_x} - \frac{K_{0x} + k_{0x} + k_{1x} |V_{z1}|}{K_x} - V_{z1} \sin \alpha_x \quad (22a)$$

и

$$V_{yz} = \frac{U_{34y}}{K_y} - \frac{K_{0y} + k_{0y} + k_{1y} |V_{z1}|}{K_y} - V_{z1} \sin \alpha_y \quad (22b)$$

В уравнениях (22a) и (22b) не учитываются отклонения плоскостей датчиков Холла от осей X и Y потому, что они вносят ошибку меньше 0,01% и тоже влияние 2. гармоники от 2, 3 и 5 членов уравнения (1) (5 член уравнения (13)), потому что k_2/K у всех датчиков $< 10^{-2}$.

Для проверки этого способа вычисления V_x , V_y , V_z было сделано контрольное измерение в магните СП-40, у которого в центре хорошая однородность и направление магнитного поля известно.

Из измерения в положении измерительной головки, когда $\vec{B} = B_z = 2,18 \text{ Т}$, определена величина \vec{B} при помощи датчиков и МЯР. Потом измерительная головка была повернута на 8° вокруг оси y и из измеренных напряжений U_{34x} , U_{34y} , U_{34z} в том же магнитном поле определены B_x , B_y и B_z . То же самое измерение сделано и при поворачивании головки вокруг оси x . Разброс в величинах \vec{B} , определенных из отдельных измерений всеми головками был меньший, чем $\pm 0,03\%$ и в определении направления \vec{B} , $< \pm 5'$.

*Уточнение
результатов*

ТАБЛИЦА I.

Ток питания I = 50 ма.

Датчик	УТ мкВ	K ₀ мВ	K мВ/Г	K ₀ мВ	K ₁ мВ/Г	K ₂ К	2γ ₂	α _{XZ} α _{YZ}	ΔM %/о	Изм. соств.		
										B _X	B _Y	B _Z
КМК-24	0	+0,006	15,5	-0,031	+ 0,0552	1,04.10 ⁻²	-46°	7°	0,00			
ΔМК-19	3	+0,076	35	-0,048	+ 0,282	5,38.10 ⁻³	+7°50'	12°	0,01			
КМК-29	0	-0,025	62,4	-0,076	-0,9779	6,5.10 ⁻³	-20°	7°	0,01			
ΔМК-55	I	+0,008	8,4	+0,034	0	7,5.10 ⁻³	+4°55'	3°	0,00			
КМК-25	0	-0,015	27,8	-0,045	0	9,8.10 ⁻⁴	-3°20'	0	0,01			
КМК-32	2	+0,066	18	-0,025	-0,0422	1,5.10 ⁻³	-46°	-5°	0,01			
КМК-31	2	+0,020	13,6	-0,007	0	4,5.10 ⁻³	+25°	8°	0,00			
КМК-27	5	+0,006	12,2	-0,016	0	6,7.10 ⁻³	-0°41'	-00°	0,00			
ΔМК-82	0	+0,175	10,73			1,7.10 ⁻³			0,00			
КМК-54	0	+0,252	8,47			5,4.10 ⁻⁴	-8°20'		0,01			
ΔМК-80	I	+0,066	8,5			3,4.10 ⁻³			0,00			
ΔМК-52	0	-0,004	7,41			279.10 ⁻³	-4°55'		0,00			

ЖИТЕРАТУРА

1. O.Madelung: Halbleiter, Handbuch der Physik, Band XX, Elektrische Leitungspänomene II, Herausgegeben von. S.Flügge, Springer Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg 1957
2. K.Měřinský: Využitie Hallovo javu u polovodičov k meraniu zložiek vektora magnetickej indukcie. Kandidátska dizertačná praca, Elektrotechnický ústav SAV, Bratislava 1961.
3. I.Hlásnik, F.Chovanec, M.Polák: Measurements of Magnetic Fields at Low Temperature Using Hall Generators. Cryogenics 6 (1966) 89.
4. I.Hlásnik: O napät'ovej citlivosti magnetooporovych sond. Elektrotechnický časopis XVII (1966) 321.
5. E.H. Putley: Hall Effect and Related Phenomena. Butterworths, London 1960.
6. J.Haeusler, H.J.Lippmann, Solid State Electronics 11 (1968) 173.
7. B.Turck, Nuclear Instruments and Methods 97, (1971) 587
8. Ю.Бешко, и др. "Магнитное поле 2-метровой жидководородной пузырьковой камеры "Людмила". Сообщение ОИЯИ I-6769, Дубна, (1972)
9. Lippmann H.J., Kührt F, Zeitschrift für Naturforschung 13a, 474 (1958)

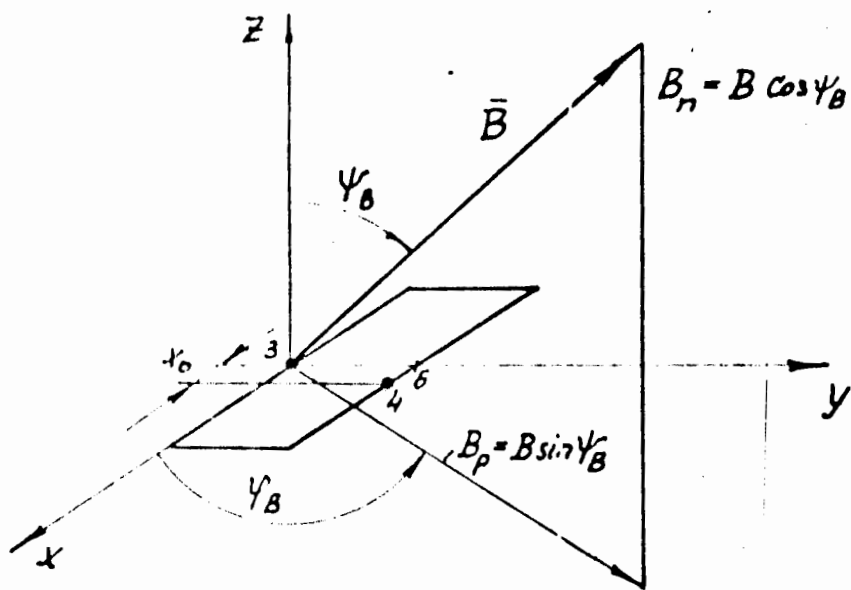


Рис. 1. Датчик Холла в произвольно ориентированном магнитном поле.

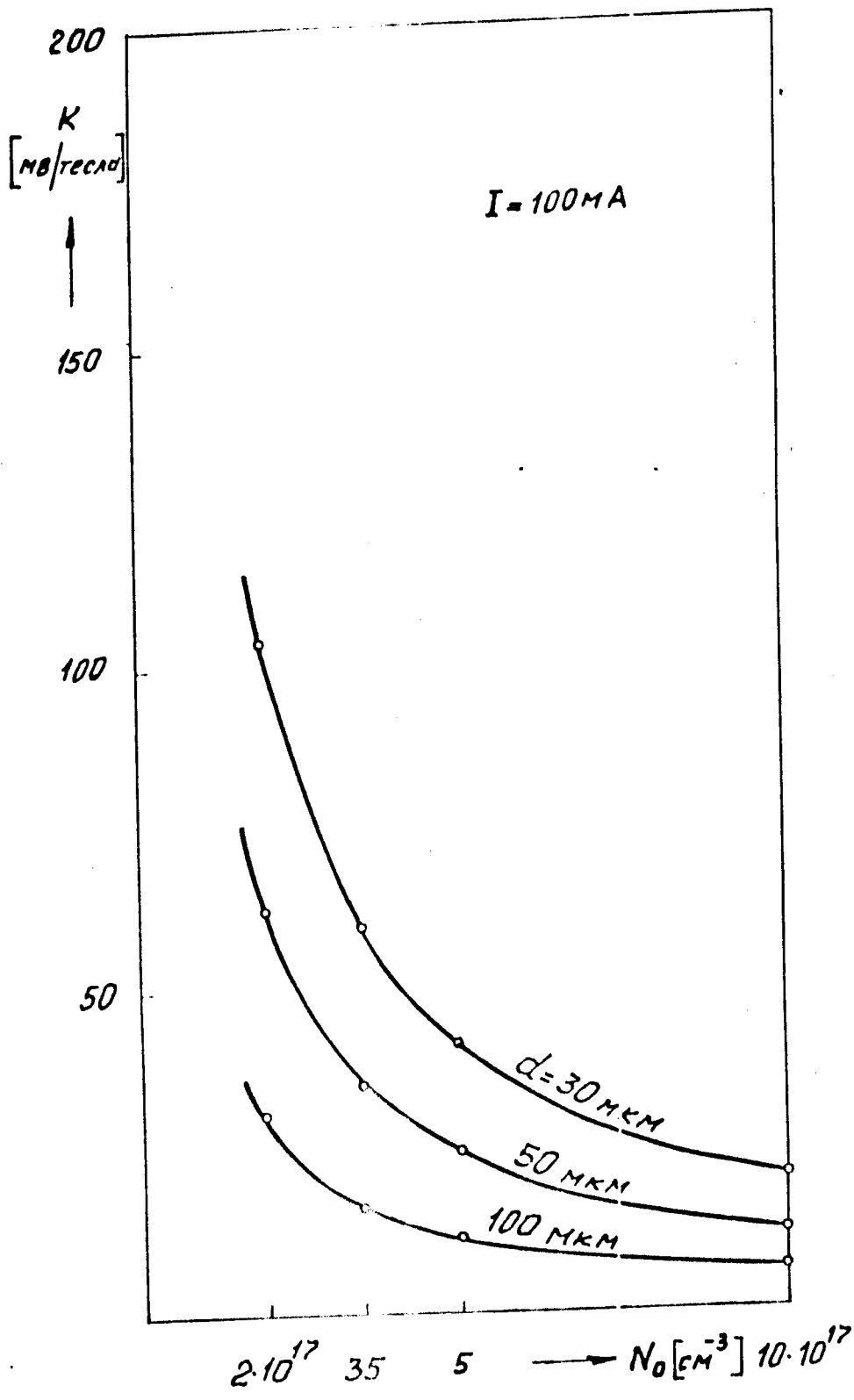


Рис. 2. Чувствительность датчиков Холла в зависимости от толщины.

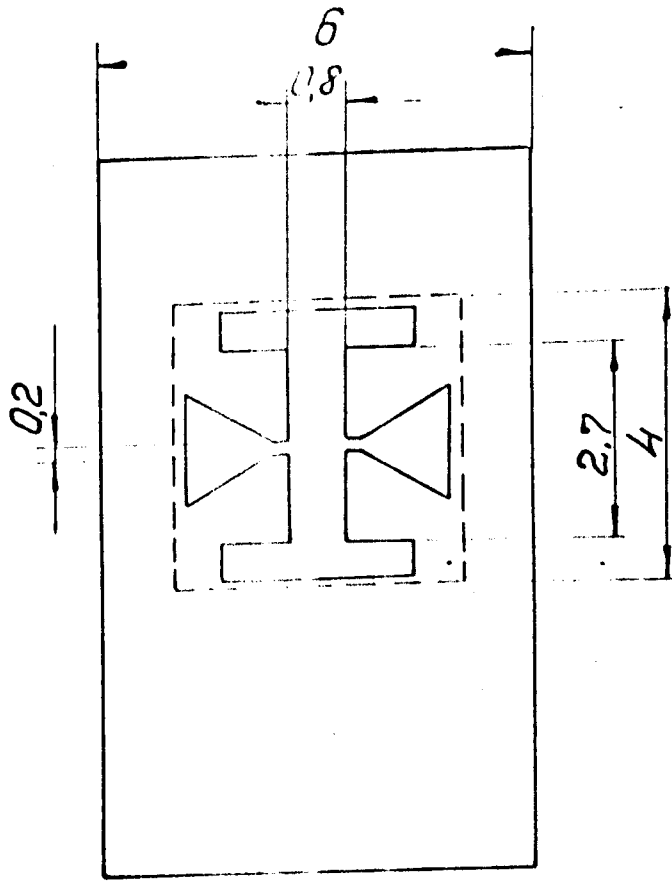


Рис. 3.

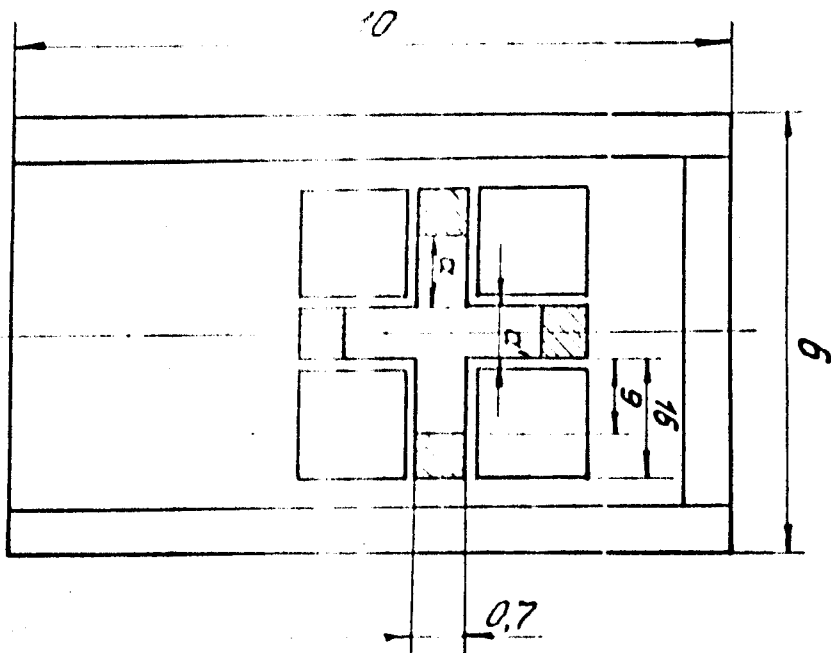


Рис. 4. Конструкция датчиков Холла.

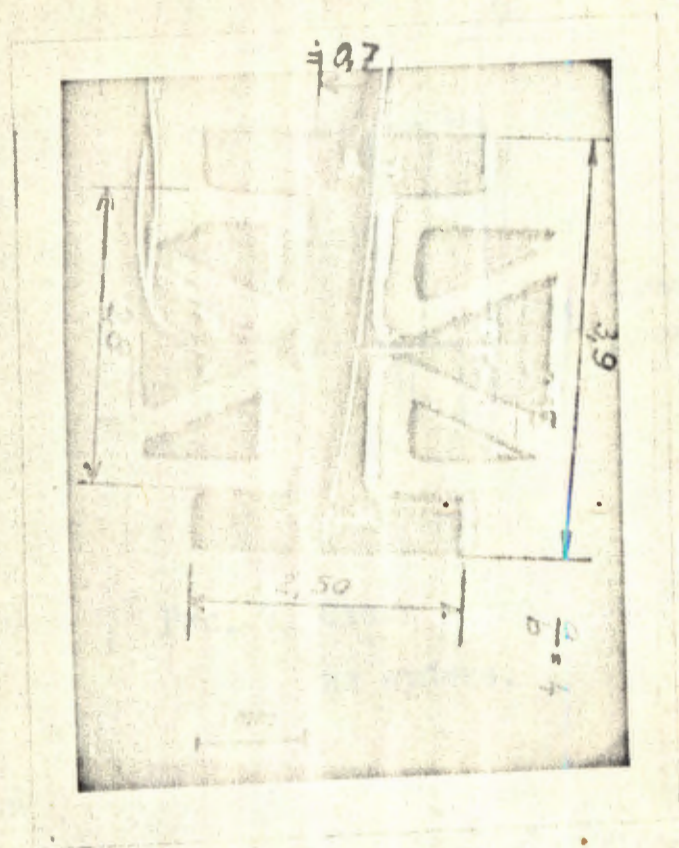


Рис. 5.

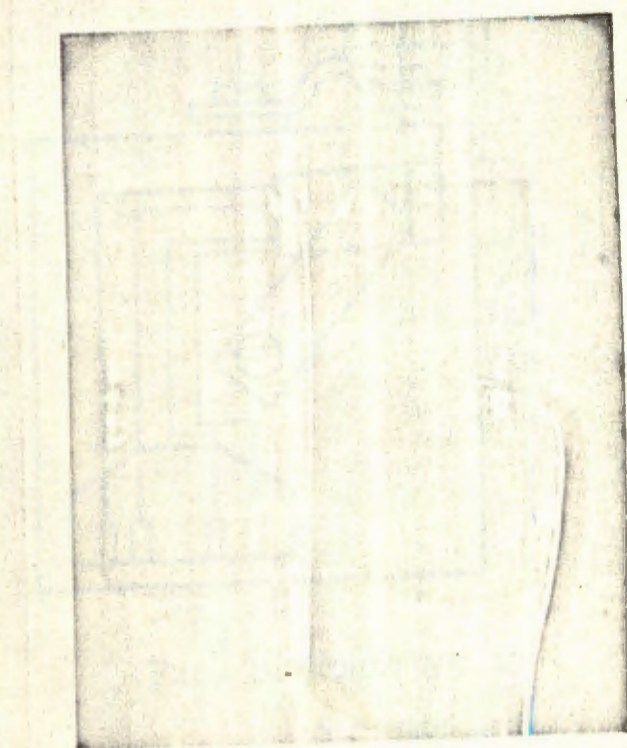


Рис. 6. Фотографии датчиков Холла (увеличено).

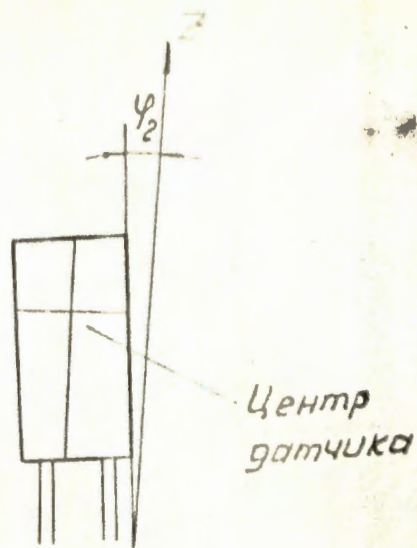


Рис. 7. Схема расположения датчика Холла на кубике.

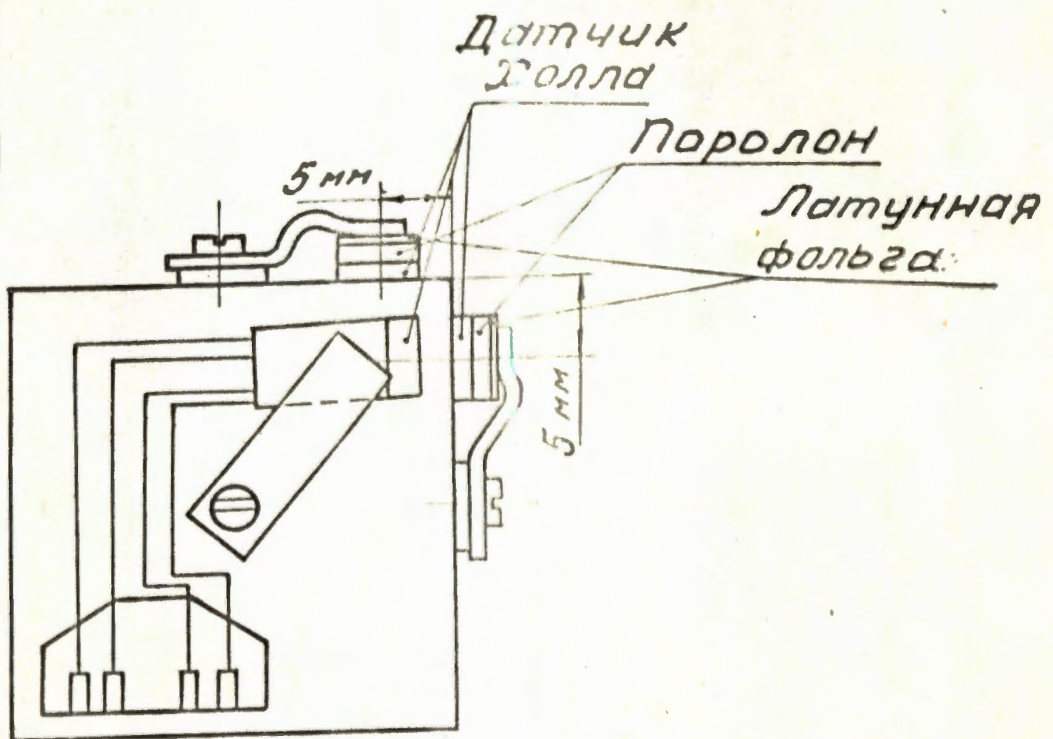


Рис. 8. Конструкция измерительной головки с тремя датчиками Холла.

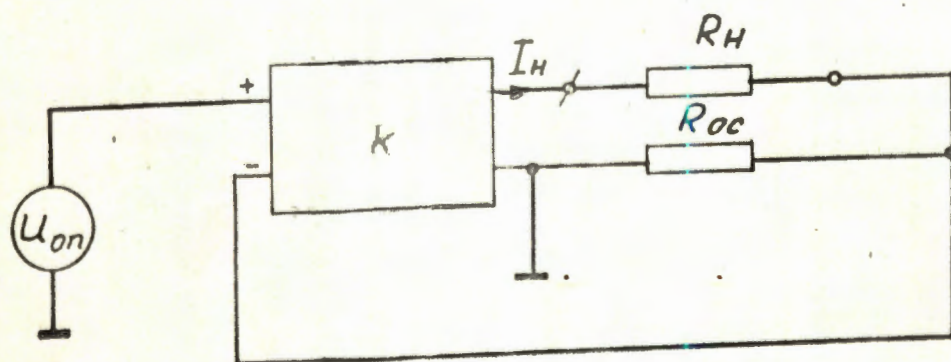


Рис. 9. Блок-схема стабилизированного источника питания.

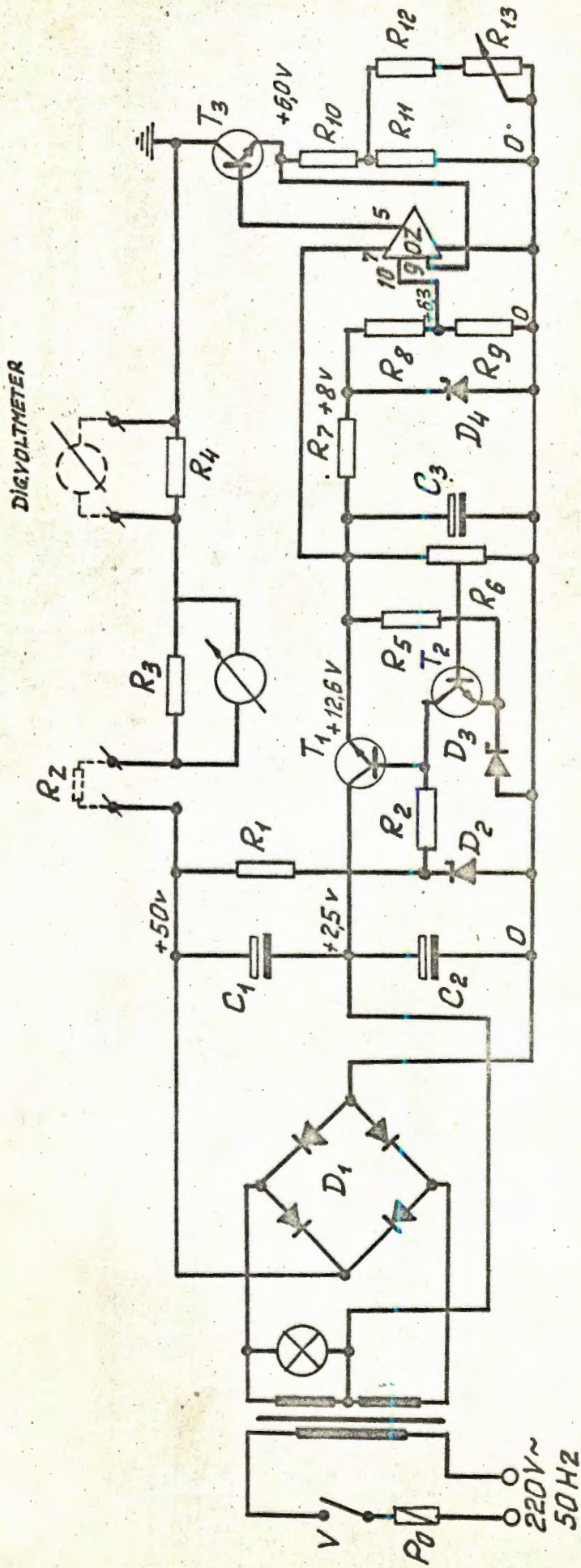


Рис. 10. Принципиальная схема стабилизированного источника питания.

- R1 - 680, R2 - 18k, R3 - 0,1, R4 - 1, R5 - 470, R6 - 47k, R7 - 90,
 R8 - 380, R9 - 1220, R10 - 52, R11 - 9, R12 - 40, R13 - 68,
 C1 - 1000 MF/50V, C2 - 1000 MF/50V, C3 - 100 MF/15V, D1 - KY 705,
 D2 - KZ 715, D3 - 1N270, D4 - KZZ 82, T1 - KF 608, T2 - KC 509, T3 - KU 602,
 C2 - 1YT 401A.