

ГРАДИЕНТОМЕТР НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Измерения параметров магнитного поля являются основой всех магнитных измерений. Большинство методов измерений параметров магнитного поля базируется на силовом (энергетическом) взаимодействии магнитного поля с макро- или микроскопическими токами и электромагнитной индукции. В работе рассматривается возможность построения градиентометра напряженности магнитного поля на основе абсолютной винтовой неустойчивости электронно-дырочной плазмы полупроводникового образца. Приведены функциональная схема градиентометра и результаты экспериментальных и теоретических исследований чувствительного элемента градиентометра.

Ключевые слова: градиент напряженности, образец, поле, чувствительный элемент, диапазон, чувствительность.

Введение. Во многих областях науки и техники часто возникает необходимость измерять различные параметры магнитных полей. Например, в криогенной технике, электроэнергетике, приборостроительной, машиностроительной, электронной и радиотехнической промышленности и т.д., при неразрушающем контроле различных объектов, при измерении больших токов без разрыва цепи, в медицине. Каждая из этих областей предъявляет свои требования к диапазону и точности измерений, условиям эксплуатации средств измерения. Одними из наиболее широко измеряемых величин в области магнитных измерений являются напряженность и индукция магнитного поля, для измерения которых используются различные магнитометры [1].

Следует отметить, что случаи существования равномерных магнитных полей в практике являются достаточно редкими. Для оценки неравномерности магнитного поля используется характеристика, которая называется градиентом напряженности « $grad H$ » [A/m²].

Градиент напряженности — это производная абсолютной величины напряженности в какой-либо точке поля по направлению наибольшего увеличения напряженности. В однородном магнитном поле напряженность одинакова по величине и направлению, $grad H = 0$. В неоднородном магнитном поле напряженность поля меняется от точки к точке и $grad H > 0$.

Диапазон напряженностей магнитных полей, в которых осуществляется измерение градиента напряженности, лежит в очень широких пределах, от слабых магнитных полей с индукцией (10^{-13}) Тл и менее (например, магнитное поле земли $5 \cdot 10^{-5}$ Тл), до сверхсильных магнитных полей с индукцией

десятки и тысячи тесла (например, поля сверхпроводящих магнитов) [2]. Приборы для измерения градиента напряженности магнитного поля (градиентометры) широко используются в цеховых и лабораторных условиях при исследованиях в постоянных магнитных полях, в измерениях межполюсных зазоров электромагнитов и каналах соленоидальных систем и др. Градиентометры напряженности магнитного поля применяются в задачах неразрушающего контроля ферромагнитных объектов [3].

Одним из основных элементов градиентометра является первичный измерительный (магнитоизмерительный) преобразователь, предназначенный для преобразования магнитной величины в другую величину (электрическую, механическую, оптическую), более удобную для дальнейшей обработки измерительного сигнала.

Для измерения градиента напряженности магнитного поля используется два или более идентичных измерительных преобразователя напряженности магнитного поля, закрепленных на жесткой базе.

Исходя из физических эффектов и явлений, лежащих в основе работы преобразователей; их можно разделить на несколько групп: магнитомеханические, магнитооптические, электромагнитные и др. Следует отметить, что магнитомеханические и магнитооптические преобразователи в области измерения напряженности магнитного поля получили небольшое использование. Наибольшее применение получили гальваномагнитные преобразователи.

Гальваномагнитные преобразователи — преобразователи, принцип действия которых основан на использовании физических явлений, возникающих

при воздействии магнитного поля на движущийся заряд. Большое применение в магнитоизмерительной аппаратуре получили преобразователи, основанные на эффекте Холла (преобразователи Холла) и магниторезистивном эффекте (магниторезистивные), ферро модуляционные преобразователи и др.

Значение выходной величины преобразователя Холла, которой является э.д.с, зависит от размеров, тока, протекающего по преобразователю, и индукции магнитного поля. Преобразователи Холла отличаются высокой чувствительностью и линейным выходным сигналом.

Принцип действия магниторезистивного преобразователя основан на изменении сопротивления материала (обычно полупроводникового) при изменении индукции внешнего магнитного поля. Зная величину сопротивления, можно определить значение индукции магнитного поля.

Принцип действия ферро модуляционного преобразователя основан на изменении магнитного состояния ферромагнетика под воздействием двух магнитных полей разных частот. Информативным параметром выходного сигнала подобного преобразователя является изменение значения переменного напряжения.

Для нахождения градиента напряженности магнитного поля вдоль какого-либо направления необходимо определить отношение разности напряженности поля в двух точках вдоль этого направления к расстоянию между ними. В настоящее время для многих измерительных преобразователей напряженности магнитного поля информативный параметр выходного сигнала — это изменение амплитуды, что обуславливает возникновение определенных трудностей при его передаче по линии связи и обработке.

Существует класс физических явлений и эффектов в твердых телах, заключающихся в возбуждении электрических колебаний с частотой, зависящей от напряженности магнитного поля.

К таким эффектам относится эффект возникновения абсолютной винтовой неустойчивости электронно-дырочной плазмы полупроводникового образца. Абсолютная винтовая неустойчивость полупроводниковой плазмы проявляется в виде спонтанных колебаний тока, протекающего по образцу [4]. Частоту электрических колебаний определяют параметры полупроводниковой плазмы и изменения напряженностей электрического и магнитного полей. Это делает возможной разработку частотных измерительных преобразователей физических величин на основе этого эффекта [5–7]. В частности, влияние напряженности магнитного поля на частоту позволяет построить преобразователи параметров магнитного поля с частотным выходным сигналом [8].

В данной работе рассматривается градиентометр с преобразованием градиента напряженности магнитного поля в интервал времени.

Теория. В основе принципа действия преобразователя градиента напряженности магнитного поля лежит явление винтовой неустойчивости электронно-дырочной плазмы полупроводникового образца. Если образец поместить в электрическое поле с напряженностью E и магнитное поле с индукцией B , значения которых превышают пороговые значения $E_{кр}$ и $B_{кр}$ то возмущение квазинейтральной плотности полупроводниковой плазмы усиливается и перемещается вдоль образца. Если напряженности электрического и индукции магнитного полей превышают критические ($E \geq E_{кр}$; $B \geq B_{кр}$), то в об-

разце возникают спонтанные электрические колебания [9]. Для вывода колебаний во внешнюю цепь можно использовать один из способов, рассмотренных в работе [10]. Значения $E_{кр}$ и $B_{кр}$ связаны между собой соотношением [11]:

$$E_{кр} B_{кр} = \frac{6KD_a}{m\mu_m^2}, \quad (1)$$

где D_a — коэффициент амбиполярной диффузии; μ_m — биполярная подвижность; m — мода; K — волновое число.

Выразив величины D_a , μ_m и K через параметры полупроводниковой плазмы и размеры образца для моды $m = 1$ из выражения (1) получим:

$$E_{кр} = \frac{12(n\mu_n + p\mu_p) \cdot (n\mu_n D_p + p\mu_p D_n)}{\sqrt{3anp\mu_n\mu_p(\mu_n + \mu_p)^2}} \cdot \frac{1}{B_{кр}}, \quad (2)$$

где μ_n и μ_p — подвижности электронов и дырок; D_n и D_p — коэффициенты диффузии электронов и дырок; n и p — концентрации электронов и дырок; a — поперечный размер образца.

При выполнении образца в виде стержня квадратного сечения, снабженного торцевыми контактами, и создании электрического поля в нем напряжением U , приложенным к торцевым контактам, преобразуем выражение (2) к виду:

$$U_{кр} = \frac{L}{H}, \quad (3)$$

где L — длина образца; H — напряженность магнитного поля.

Зависимость критического напряжения возбуждения электрических колебаний в образце от напряженности магнитного поля позволяет использовать пороговый характер абсолютной винтовой неустойчивости для построения измерительного преобразователя градиента напряженности магнитного поля. При помещении двух стержневых полупроводниковых элементов на расстоянии d друг

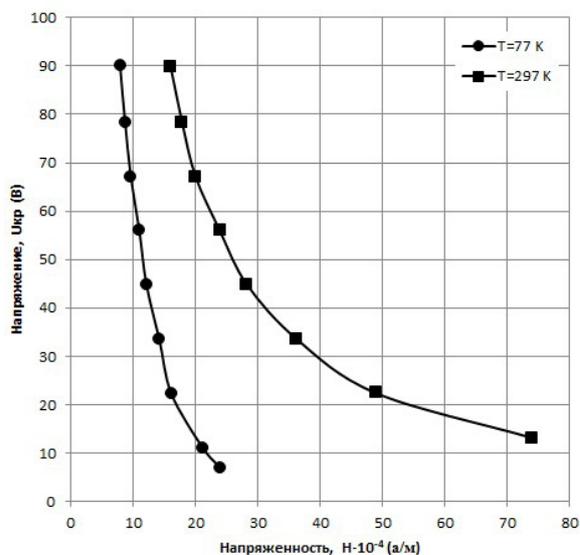


Рис. 1. Зависимость критического напряжения от напряженности магнитного поля для образца из германия

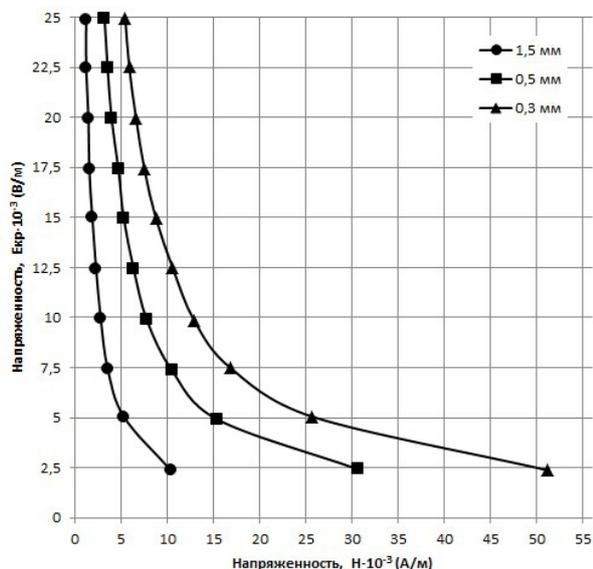


Рис. 2. Зависимость критической напряженности электрического поля от напряженности магнитного поля для образца из антимида индия

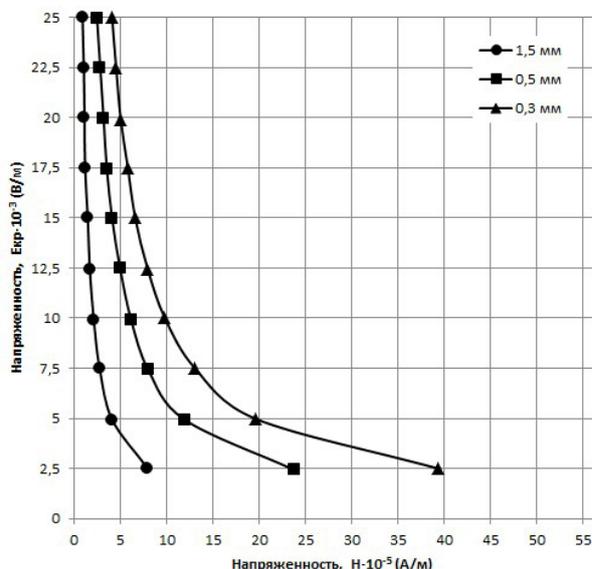


Рис. 3. Зависимость критической напряженности электрического поля от напряженности магнитного поля для образца из кремния

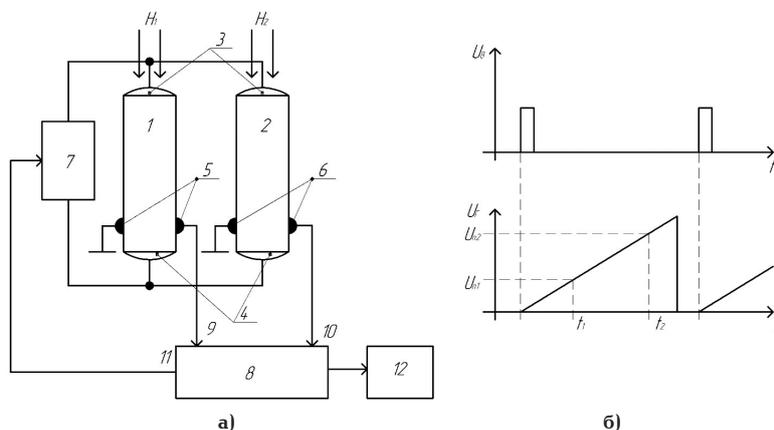


Рис. 4. Устройство градиентметра и временные диаграммы работы

от друга в неравномерное магнитное поле получим, что $U_{KP1} \neq U_{KP2}$. Причем при $H_1 < H_2$ будем иметь $U_{KP1} > U_{KP2}$. Определив значения напряжений U_{KP1} и U_{KP2} , используя выражение (3), можно рассчитать градиент напряженности магнитного поля.

Результаты экспериментальных исследований зависимости критического напряжения от напряженности магнитного поля для образца из электронного германия, изготовленного в виде бруска квадратного сечения со стороной 1 мм и длиной 4 мм, проведенных при температуре 297 К и 77 К, приведены на рис. 1.

На рис. 2 и рис. 3 показаны теоретические зависимости критической напряженности электрического поля от напряженности магнитного поля, рассчитанные для образцов разного сечения из антимида индия и кремния.

Из представленных зависимостей видно, что преобразователи градиента напряженности магнитного поля, выполненные из антимида индия, могут работать в более слабых магнитных полях, чем преобразователи из германия и кремния.

Кроме того, нижняя граница напряженности магнитного поля, в котором работают рассматриваемые преобразователи, существенно понижается

с увеличением поперечного размера a и температуры магниточувствительного элемента.

Таким образом, выбором материала и размеров магниточувствительного элемента можно определить диапазон напряженности магнитного поля, в котором данные преобразователи градиента напряженности магнитного поля могут быть использованы.

На рис. 4а схематично показано устройство подобного градиентметра. Чувствительные элементы 1 и 2 градиентметра выполнены в виде стержней из полупроводникового материала, например, германия.

Для создания электронно-дырочной плазмы и электрического поля в элементах 1 и 2 они снабжены торцевыми инжектирующими 3 и омическими 4 электродами. Инжектирующие электроды обладают свойствами смещенного в прямом направлении р-п перехода. Эти электроды подключаются к генератору линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН) 7. Фиксация возникновения электрических колебаний в чувствительных элементах осуществляется с помощью боковых омических электродов 5 и 6, сигналы с которых поступают на соответствующие входы микроконтроллера 8.

Градиентометр работает следующим образом. В исходном состоянии напряжение на выходе ГЛИН равно нулю. Элементы 1 и 2 помещаются в магнитное поле параллельно его силовым линиям. При наличии градиента напряженности магнитного поля элемент 1 будет находиться в магнитном поле с напряженностью H_1 , а элемент 2 — в поле с напряженностью H_2 , отличной от напряженности H_1 . Микроконтроллер 8 формирует на выходе 11 импульс U_B , возбуждающий генератор 7, который создает на элементах 1 и 2 линейно возрастающее электрическое напряжение U_r :

$$U_r = kt, \quad (4)$$

где k — постоянный коэффициент; t — время.

При превышении значения напряжения U_r критических напряжений U_{KP1} и U_{KP2} , соответствующих напряженностям магнитного поля H_1 и H_2 , на боковых поверхностях элементов 1 и 2 спонтанно возникнут колебания поперечного напряжения. При выполнении условия $H_1 \neq H_2$ начало колебаний будет наступать в разные моменты времени t_1 и t_2 (рис. 4б). Из равенства критических напряжений (U_{KP1} и U_{KP2}) возникновения электрических колебаний в элементах 1 и 2 и напряжения генератора 5 (U_r) получим:

$$U_{KP1} = kt_1; \quad U_{KP2} = kt_2. \quad (5)$$

Моменты возникновения электрических колебаний в элементах 1 и 2 фиксируются на входах 9 и 10 микроконтроллера 8. В момент возникновения электрических колебаний в элементе 1 на входе 9 микроконтроллера 8 формируется логическая «1». По этому сигналу микроконтроллер 8 сохраняет содержимое внутреннего таймера-счетчика в переменной N_1 . В момент возникновения электрических колебаний в элементе 2 на входе 10 микроконтроллера 8 формируется логическая «1». По этому сигналу — последний сохраняет содержимое внутреннего таймера-счетчика в переменной N_2 . Значения переменных N_1 и N_2 определяются выражениями:

$$N_1 = t_1 f; \quad N_2 = t_2 f, \quad (6)$$

где f — частота тактового генератора микроконтроллера 8.

Выразив из формулы (6) значения t_1 и t_2 и подставив их формулы (5), получим:

$$U_{KP1} = \frac{kN_1}{f}; \quad U_{KP2} = \frac{kN_2}{f}. \quad (7)$$

Отсюда выражение для градиента напряженности магнитного поля может быть представлено в виде:

$$\begin{aligned} \text{grad}H &= \frac{H_2 - H_1}{d} = \\ &= -\frac{Cf}{d} \frac{N_2 - N_1}{kN_1} = \frac{A \left(\frac{1}{N_2} - \frac{1}{N_1} \right)}{d}. \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, чувствительность предлагаемого градиентометра напряженности магнитного поля определяется не только параметрами электронно-дырочной плазмы и размерами полупроводниковых элементов 1 и 2, но коэффициентом преобразова-

ния k генератора линейно нарастающего напряжения 7. Уменьшение коэффициента k приводит к повышению чувствительности градиентометра.

Заключение. Анализ результатов проведенных экспериментальных и теоретических исследований показал возможность использования порогового характера возбуждения абсолютной винтовой неустойчивости электронно-дырочной плазмы полупроводникового образца, помещенного в продольные электрическое и магнитное поля для построения градиентометров напряженности магнитного поля, обладающих высокой чувствительностью и работающих в широком диапазоне температур в сильных магнитных полях.

Библиографический список

1. Eren H., Webster J. G., Measurement Instrumentation and Sensors Handbook: Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement. New York: CRC Press, 2014. 3559 с.
2. Ripka P., Janošek M. Advances in magnetic field sensors // IEEE Sensors Journal. 2010. Vol. 10 (6). 5443656. P. 1108–1116. DOI: 10.1109/JSEN.2010.2043429.
3. Ahmad E., Biruu F. A., Missous M. Non-destructive detection of defects in materials by a hand-held QWHE magnetic scanner // 55th Annual Conference of the British Institute of Non-Destructive Testing, NDT 2016. 2016. P. 296–304.
4. Иванов Ю. Л., Рывкин С. М. Возникновение колебаний тока в образцах германия, помещенных в электрическое и продольное магнитное поле // Журнал технической физики. 1958. Т. 28. С. 54–56.
5. Cheredov A. I., Shchelkanov A. V. Frequency converters based on oscillistor // 2014 12th International Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). 2014. DOI: 10.1109/APEIE.2014.7040846.
6. Гаман В. И., Дробот П. Н. Пороговая частота винтовой неустойчивости электронно-дырочной плазмы в кремниевых осцилляторах // Известия вузов. Физика. 2001. Т. 44, № 11. С. 39–44.
7. Gaman V. I., Drobot P. N. The magnetic sensors with frequency output // Proceedings 5th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2000. 2000. Vol. 1. P. 158–159. DOI: 10.1109/APEIE.2000.913111.
8. Cheredov A. I., Shchelkanov A. V., Akhmedzhanov R. A., Korenev E. O. Magnetically sensitive converter of the magnetic field gradient based on oscillistor // 2017 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2017. P. 1–3. DOI: 10.1109/Dynamics.2017.8239443.
9. Чередов А. И., Щелканов А. В., Ахмеджанов Р. А., Корнев Е. О. Магниточувствительный преобразователь градиента напряженности магнитного поля на основе осциллятора // Динамика систем, механизмов и машин. 2017. Т. 5, № 4. С. 282–286. DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-4-282-286.
10. Cheredov A. I., Shchelkanov A. V. Displacement sensors with frequency output based on helical instability // 2014 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. 2014. P. 1–4. DOI: 10.1109/Dynamics.2014.7005645.
11. Hurwitz C. E., McWhorter A. L. Growing helical density waves in a semiconductor plasmas // Physical Review Letters. 1964. Vol 134 (4A). P. 1033–1050. DOI: 10.1103/PhysRev.134. A1033.

АХМЕДЖАНОВ Равиль Абдрахманович, кандидат технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Омского государственного университета путей сообщения. AuthorID (РИНЦ): 533818

ЧЕРЕДОВ Александр Иванович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Радио-

технические устройства и системы диагностики» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

SPIN-код: 6957-1660,

AuthorID (РИНЦ): 471995

AuthorID (SCOPUS): 6507212339

ЩЕЛКАНОВ Андрей Владимирович, старший преподаватель кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики», ОмГТУ.

SPIN-код: 2564-1461

ORCID: 0000-0002-1354-8708

AuthorID (SCOPUS): 56447045400

ResearcherID: P-9053-2015

Адрес для переписки: shchelkanov@omgtu.ru

Для цитирования

Ахмеджанов Р. А., Чередов А. И., Щелканов А. В. Градиентометр напряженности магнитного поля // Омский научный вестник. 2021. № 4 (178). С. 75–79. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-178-75-79.

Статья поступила в редакцию 01.06.2021 г.

© Р. А. Ахмеджанов, А. И. Чередов, А. В. Щелканов