

УДК 537.633.2

В. Р. Мадьяров, ст. преподаватель (БГТУ)

ДВУХЧАСТОТНЫЕ ХОЛЛОВСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ВЫСОКООМНОМ КРЕМНИИ

С помощью двухчастотной холловской методики исследовались два слабопроводящих кремниевых образца. Основная проблема заключается в том, чтобы исключить вклад вследствие нестабильности усиления путем проведения измерений на повышенных частотах. Получены и сопоставлены зависимости холловского напряжения от напряжения питания образца и магнитного поля на разностной (70 Гц) и суммарной (2190 Гц) частотах, из которых следует наличие диапазона напряжений и магнитных полей, где различие между этими зависимостями незначительно. В образцах с малой проводимостью эти зависимости, полученные на суммарной частоте, отклоняются от линейных в результате влияния наведенного сигнала, который отличается по амплитуде и фазе от холловской гармоники.

Two low conductive silicon specimen were tested using Hall double frequency measurement technique. Main problem is to avoid contribution from the amplification instability by using higher frequency. Hall voltage dependences versus sample feeding voltage and external magnetic field obtained at differential 70 Hz frequency and summary 2190 Hz frequency were compared and showed that there are the sample feed voltage and magnetic field ranges where the difference between them is sufficiently low. The dependences obtained at summary frequency deviate from linear behavior at higher magnetic fields in the case of lower conductivity due to induced signal differing by phase and amplitude from the Hall harmonic signal.

Введение. Двухчастотный метод измерений холловской ЭДС, предложенный в ранней работе [1], обеспечивает сравнительно простое выделение полезного сигнала из совокупности ЭДС, вызванных побочными эффектами (неэквивалентности, Нернста – Эттингсгаузена). Метод основан на измерении ЭДС Холла, частота которой равна разности или сумме частот магнитного поля и тока, протекающего через образец. Применение фильтра и электрометрического усилителя обеспечивает возможность выделения холловской составляющей сигнала и выполнения измерений на образцах с высоким удельным сопротивлением [3–5]. Для применения двухчастотного метода исследования высокоомных образцов следует снижать шунтирующее действие емкости, включающей в себя емкость образца, соединительного кабеля и входную емкость электрометра, что не всегда возможно. Частота регистрируемой ЭДС Холла выбирается из условия

$$\frac{1}{2\pi\nu RC} \gg 1, \quad (1)$$

где R – сопротивление образца; C – суммарная емкость образца, соединительного кабеля и электрометрического усилителя.

Поэтому в ряде случаев рабочую частоту выходного сигнала целесообразно выбрать низкой. При этом возникают серьезные трудности из-за нестабильности частот электрического и магнитного полей, которая влечет и нестабильность частоты ЭДС Холла вследствие узкополосного усиления. С другой стороны, при очень низких частотах значительно усложняется схема усилителя. Повышение

частоты, наряду с потерей точности измерений, может быть сопряжено также с увеличением вклада в регистрируемый сигнал электромагнитных помех, проникающих в измерительный тракт. Следует отметить, что увеличение разности или суммы частот электрического и магнитного полей приводит к экспоненциальному ослаблению вклада в измеряемый сигнал побочных напряжений [2].

В данной работе проведены двухчастотные измерения ЭДС Холла и сопоставлены результаты, полученные на низкой (70 Гц) и повышенной (2190 Гц) частотах для двух образцов кремния с удельным сопротивлением 9,5 и 39,4 Ом · м соответственно.

Основная часть. Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Питание образцов в виде кремниевых пластинок с размером 15×15×0,5 мм обеспечивалось от генератора синусоидальных колебаний 2, нестабильность частоты которого не превышала 0,1%. Частота переменного электрического поля составляла $\nu_E = 1130$ Гц. Переменное магнитное поле, направление которого перпендикулярно к плоскости образца, создавалось электромагнитом. Питание электромагнита осуществлялось через усилитель мощности от генератора синусоидальных колебаний 3, работающего на частоте $\nu_B = 1060$ Гц и синхронизированного с генератором 2. Магнитная индукция в зазоре электромагнита 5 измерялась зондом в виде плоской катушки диаметром 5 мм, которая располагалась параллельно торцам электромагнита. Размер области магнитного поля в месте расположения образца составлял 25×25×1,5 мм.

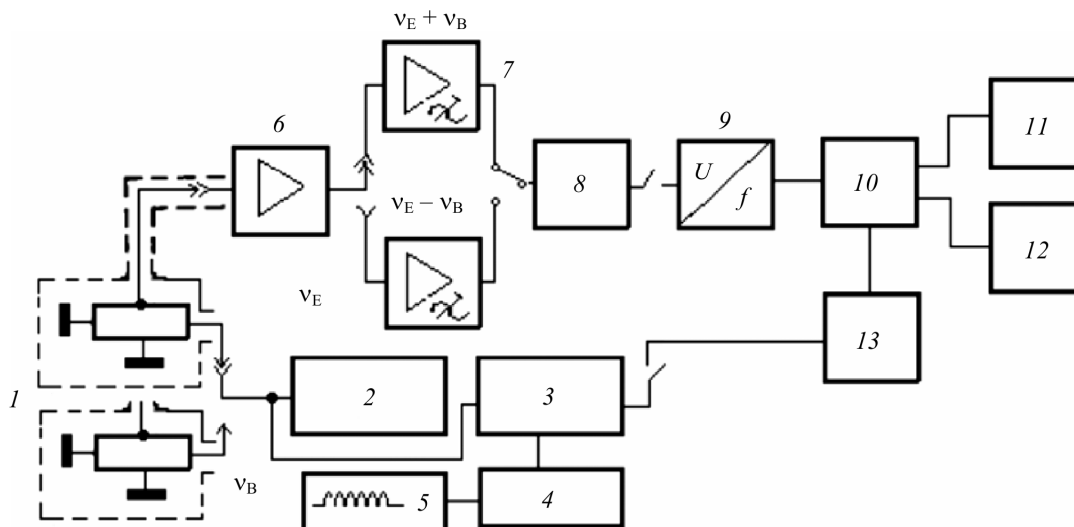


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки:

1 – образцы; 2 – генератор питания образца (ГЗ-112);

3 – генератор питания электромагнита (ГЗ-112); 4 – усилитель мощности;

5 – электромагнит; 6 – предусилитель (К544УД1А); 7 – узкополосные усилители;

8 – цифровой вольтметр; 9 – преобразователь напряжение/частота (ADVFC32);

10 – коммутатор; 11, 12 – счетчики импульсов; 13 – фазовращатель

Измерения проводились на разностной и суммарной частотах: $v_1 = v_E - v_B$ и $v_2 = v_E + v_B$. Сигналы с измерительных холловских контактов на исследуемом образце подавались на вход предусилителя 6, собранного на микросхеме К544УД1А. Усиливаемый сигнал содержит ЭДС Холла с частотами v_1 или v_2 , ЭДС неэквипотенциальности холловских контактов с частотой v_E , ЭДС, индуцированные магнитным и электрическим полями (с частотами v_E и v_B), а также сигналы электромагнитных наводок с частотой v_B . С выхода предусилителей сигналы поступают на RC-фильтры, которые собраны по схеме, предложенной в [6], и усиливаются в узкополосных усилителях 7, настроенных на частоты 70 и 2190 Гц. Выходной сигнал с усилителей поступает на цифровой вольтметр 8. Для калибровки измерительного тракта применялся синусоидальный сигнал с аттенуатора генератора 2.

На рис. 2 показаны зависимости напряжения с выхода усилителей на суммарной и разностной частотах от индукции магнитного поля для двух образцов.

С ростом магнитной индукции наблюдается заметное расхождение в величине выходного напряжения, которое сильнее проявляется для образца с более высоким удельным сопротивлением на суммарной частоте. До значений индукции ~ 60 мТл отмечается рост напряжения, близкий к линейному для обоих образцов. На данном участке основной вклад в выходное напряжение обусловлен ЭДС эффекта Холла, так как остальные ЭДС

вследствие эффектов Эттингсгаузена и Пельтье – Риги – Ледюка, которые могут проявляться на двух указанных частотах, как показывают оценки, пренебрежимо малы.

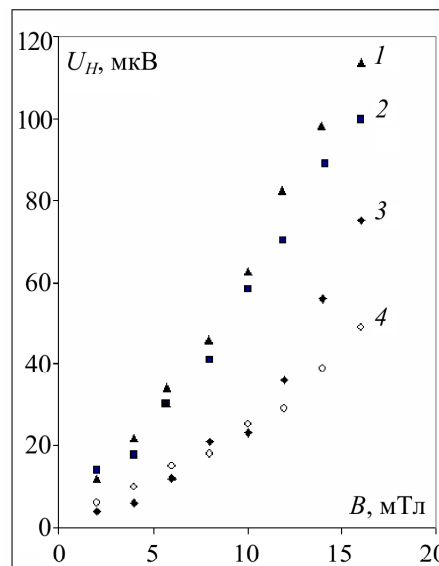


Рис. 2. Зависимости холловской ЭДС от амплитудного значения магнитной индукции на суммарной (1 и 3) и разностной (2 и 4) частотах для образцов с удельным сопротивлением $\rho = 9,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (1 и 2) и $\rho = 39,4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (3 и 4) (амплитуда напряжения на образце 2 В)

На рис. 3 представлены зависимости холловского напряжения от амплитуды напряжения на образцах. Зависимость, близкая к линейной, наблюдается для обоих образцов.

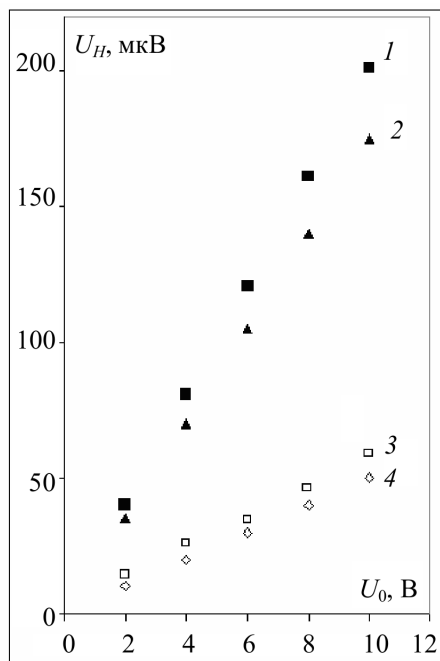


Рис. 3. Зависимости холловской ЭДС от амплитуды напряжения на образцах с удельным сопротивлением $\rho = 9,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (1 и 2) и $\rho = 39,4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (3 и 4) на суммарной (1 и 3) и разностной (2 и 4) частотах (амплитуда магнитной индукции 10 мТл)

Для выяснения влияния наведенных переменным магнитным полем сигналов на амплитуду холловского сигнала проводились измерения с применением системы синхронного интегрирования [3, 4], в состав которой входят преобразователь напряжение/частота 9 на микросхеме ADVFC32, коммутатор 10 (микросхема К155ЛА3), два счетчика импульсов 11 и 12 и источник опорного сигнала в виде меандра, который формируется генератором 3, синхронизируемым от генератора 2. Коммутатор, которым управляет опорный сигнал, переключает входы счетчиков. Опорный сигнал имел форму меандра с частотой следования импульсов, равной суммарной частоте электрического и магнитного полей ($v_E + v_B$). Импульсы с выхода преобразователя поочередно подаются на вход счетчиков двухканального частотомера таким образом, что счетчик 11 считает импульсы, когда опорный сигнал с разностной частотой v_1 положителен, а счетчик 12 – когда опорный сигнал отрицателен. Если опорный сигнал синхронизирован с синусоидальной ЭДС Холла, то при средней скважности опорного меандра, равной 1, разность счета импульсов двух счетчиков определяется формулой [4]:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{2\tau}{\pi} G U_H \cos \varphi, \quad (2)$$

где P_1 и P_2 – число импульсов, зарегистрированных за время положительных (τ_+) и отрицательных (τ_-) полупериодов опорного сигнала; $\tau = n(\tau_+ + \tau_-)$ – время измерения, равное периоду следования импульсов опорного сигнала, умноженному на число импульсов n ; G – коэффициент преобразования, который определяется калибровкой, U_H – амплитуда напряжения на входе преобразователя; φ – разность фаз между холловским и опорным сигналами, которая регулируется фазовращателем 13.

На рис. 4 представлены зависимости разности накопленного числа импульсов в двух каналах частотомера от $\cos \varphi$ для двух амплитудных значений магнитной индукции. Зависимость для сигнала разностной частоты образца с $\rho = 39,4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ близка к линейной. Однако при усилении магнитного поля при измерениях на суммарной частоте эта зависимость отличается от ожидаемой, согласно формуле (2). При $\varphi = \pi / 2$ для симметричного меандра разность отсчетов должна быть близка к нулю и обусловлена только нестабильностью генератора (зависимость 5 на рис. 4). Различие поведения этих зависимостей указывает на проникновение в измерительный тракт наведенного сигнала, содержащего гармонику, фаза которой отличается от фазы холловского сигнала.

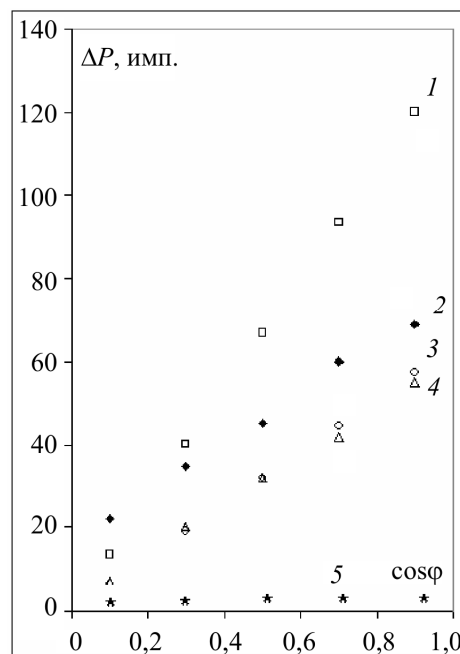


Рис. 4. Зависимости разности отсчетов от $\cos \varphi$ для магнитной индукции $B = 5 \text{ мТл}$ (3 и 4) и $B = 10 \text{ мТл}$ (1 и 2), 5 – зависимость при $B = 0 \text{ мТл}$ (образец $\rho = 39,4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\tau = 60 \text{ с}$)

Заключение. Таким образом, для двухчастотных холловских измерений на суммарной частоте заметный вклад могут вносить шумы, обусловленные переменным магнитным полем. Вклад электромагнитной наводки в полезный сигнал зависит от амплитудного значения магнитной индукции и сильнее проявляется в образцах со сравнительно более высоким удельным сопротивлением.

Полученные результаты применимы для оптимизации измерительного контура при проведении двухчастотных холловских измерений полупроводников с удельным сопротивлением порядка 10^2 Ом · м.

Литература

1. Russell, B. R. A new method for the measurement of Hall coefficient / B. R. Russell, C. Wahling // Rev. Sci. Instrum. – 1950. – Vol. 21, № 12. – P. 1028–1029.

2. Кучис, Е. В. Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования / Е. В. Кучис. – М.: Советское радио, 1990. – 263 с.

3. Березкин, В. И. Эффект Холла в природном стеклоуглероде шунгитов / В. И. Березкин, П. П. Константинов, С. В. Холодкевич // Физика твердого тела. – 1997. – Т. 39, № 10. – С. 1783–1786.

4. Двухчастотный метод измерений ЭДС Холла в высокоомных материалах с низкой подвижностью носителей заряда / А. Л. Александров [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 1982. – № 2. – С. 163–166.

5. Colman, D. High Resistivity Hall Effect Measurements / D. Colman // Rev. Sci Instr. – 1968. – Vol. 39. – P. 1946–1948.

6. Morris, E. D. New Method for the Measurement of Hall Coefficients / E. D. Morris, H. S. Johnston // Rev. Scient. Instrum. – 1968. – Vol. 39. – P. 620–621.

Поступила в редакцию 31.03.2010