

ХОЛЛОВСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ В КРЕМНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Quasi-linear range for AC Hall measurements in crystal n-silicon was found which is determined by electromagnetic disturbances at low currents and additional 3-rd harmonic generation at high current values due to nonlinearity of electromagnet. Simple method using Lissajous figures is proposed to estimate relative contributions due to asymmetric voltage, electromagnetic disturbances and Hall effect voltage. Hall effect second harmonic figures were obtained using signal scanning by magnetic field and identified by their two-loop or parabolic appearance. The observed figures were compared against oscilloscope traces obtained with and without magnetic field.

Частотные холловские методы получили широкое применение для исследования полупроводниковых материалов и сложных соединений [1–3], так как отличаются высокой чувствительностью и пониженной восприимчивостью к мешающим напряжениям. Одно из существенных преимуществ метода переменного поля и тока заключается в возможности выполнения исследований частотной зависимости эффекта Холла, а также в том, что холловский метод можно объединить с другими методами изучения электрических параметров веществ, в которых применяются переменные магнитные поля. Используя частотное питание образца, можно также исключить постоянную составляющую, обусловленную термоЭДС.

Наибольшее признание получили методы, предложенные в [4, 5], в которых переменным является один из параметров питания образца (ток или магнитное поле), а другой поддерживается постоянным. Метод переменного поля и тока не получил распространения из-за существенного влияния неизбежных электромагнитных наводок в измерительном контуре [6]. Тем не менее при измерениях высокоомных полупроводниковых образцов холловский сигнал может стать значительным и его можно зарегистрировать, применяя технически простые способы.

Если ток и магнитное поле изменяются синфазно с одной частотой ω , то сигнал поперечного напряжения является переменным и содержит постоянную составляющую, а также переменную с частотой второй гармоники, которая появляется из-за того, что напряжение Холла пропорционально току через образец и магнитной индукции. Дополнительными составляющими регистрируемого сигнала являются напряжения, возникающие вследствие асимметрии контактов и электромагнитных наводок в измерительном контуре. Как показывают опыты, при питании образца и магнита переменным током промышленной частоты 50 Гц основным источником наводок является переменное поле электромагнита. Сигнал на-

водки имеет такую же несущую частоту, но содержит гармоники более высоких порядков со значительно меньшими амплитудами. Если вольт-амперная характеристика образца близка к линейной, то переменная составляющая регистрируемого сигнала содержит две гармоники:

$$U = (U_{\text{ACC}} + U_{\text{нап}}) \cos \omega t + \frac{R_H I B_0}{2d} \cos(2\omega t + \varphi), \quad (1)$$

где U – поперечное напряжение на образце; U_{ACC} – амплитуда напряжения из-за асимметрии контактов; $U_{\text{нап}}$ – амплитуда напряжения из-за наводок в измерительном контуре; ω – циклическая частота; B_0 – амплитудное значение магнитной индукции; R_H – постоянная Холла. При последовательном включении обмотки электромагнита и образца суммарный сигнал асимметричной составляющей и наводки пропорционален амплитуде тока, а амплитуда холловского сигнала пропорциональна квадрату амплитуды тока через образец.

Соизмеримым с холловским сигналом может также стать напряжение вследствие магниторезистивного эффекта, которое пропорционально квадрату магнитной индукции. Для выбора наиболее приемлемого для измерений диапазона токов и магнитных полей необходимо оценить относительный вклад этих составляющих.

Выделение сигнала второй гармоники с помощью избирательного усилителя или компенсационных схем приводит к значительному повышению уровня аппаратных помех. В данной работе для контроля холловской составляющей сигнала поперечного напряжения, содержащей 2-ю гармонику, применяется двумерное осциллографирование, которое заключается в получении фигур Лиссажу. По форме и параметрам этих фигур можно оценить вклад гармоник, обусловленных эффектом Холла. Если в качестве развертывающей синусоиды (по оси X) используется сигнал переменного напряжения с дополнительной обмотки электромагнита, то размер фигуры по горизонтали пропорционален амплитуде магнитной индукции:

$$U_x = B_0 SN \omega \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}), \quad (2)$$

где B_0 – амплитуда магнитной индукции; N – число витков в измерительной обмотке; S – площадь сердечника электромагнита.

Численное моделирование показывает, что при увеличении уровня электромагнитных помех, которые имеют частоту, равную частоте магнитного поля, симметричность фигур, рассчитанных с использованием формул (1) и (2), заметно нарушается, причем увеличивается угол поворота фигур относительно горизонтальной оси.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Для измерений использовался образец монокристаллического кремния n -типа. Размер образца $20 \times 20 \times 0,5$ мм. Боковые контакты, формировались путем травления на боковой поверхности кристалла, которая предварительно металлизировалась. Питание образца и магнита обеспечивалось током частоты 50 Гц. Сопротивление резистора подбиралось таким, чтобы ток соответствовал линейной части вольтамперной характеристики образца.

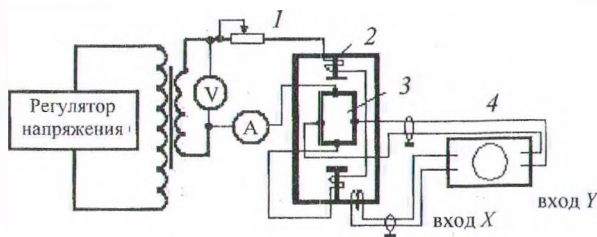


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
1 – резистор; 2 – электромагнит; 3 – образец;
4 – осциллограф

Обмотка электромагнита и образец включались последовательно. Фигуры Лиссажу регистрировались на осциллографе С1-117А с предельной чувствительностью по каналам вертикального и горизонтального отклонения 100 мкВ/дел. Развертывающее напряжение снималось с измерительной обмотки, уложенной вокруг сердечника электромагнита, и подавалось на вход X осциллографа. Площадь сердечника около $2,5 \text{ см}^2$, число витков обмотки – 50. На вход Y осциллографа подавалось поперечное напряжение с боковых контактов образца.

На рис. 2 приведены типичные осциллограммы поперечного напряжения с образца, а на рис. 3 представлены фигуры Лиссажу, полученные при различных амплитудных значениях индукции магнитного поля.

С ростом тока и магнитного поля на осциллограмме наблюдается появление второй гармоники. Сигнал, полученный вычитанием осцил-

лограмм поперечного напряжения с образца в магнитном поле и при выключенном магнитном поле, содержит холловскую составляющую.

На осциллографической фигуре вторая гармоника проявляется в виде двойной петли (рис. 3, б). По мере возрастания тока начинает заметно меняться разность фаз между колебаниями поперечного напряжения и магнитного поля, что приводит к изменению формы фигур (рис. 3, в).

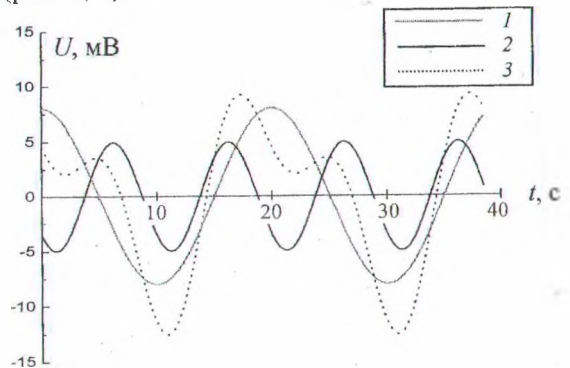


Рис. 2. Типичные осциллограммы поперечного напряжения с образца, амплитуда тока 0,1 А:
1 – при отсутствии магнитного поля;
2 – в магнитном поле 0,1 Тл; 3 – сигнал поперечного напряжения, полученный вычитанием осциллограмм 1 и 2

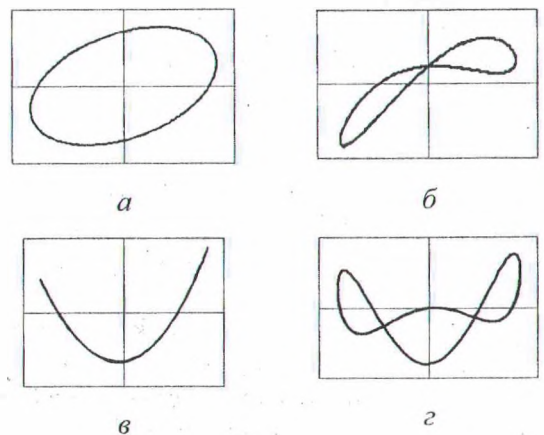


Рис. 3. Характерные фигуры Лиссажу, полученные путем развертки сигнала поперечного напряжения с образца напряжением с измерительной обмотки электромагнита при различных амплитудных значениях индукции: а – 0,04 Тл; б – 0,1 Тл; в – 0,15 Тл; г – 0,25 Тл

Появление третьей петли (рис. 3, г) сопровождается усилением асимметрии фигуры и резким ухудшением синхронизации (наблюдалось непрерывное вращение фигур, которое ускорялось с ростом магнитной индукции). Форма фигуры указывает на то, что сигнал с образца может содержать 3-ю гармонику.

Одной из причин наблюдаемого поведения фигур может быть увеличение вклада магнито-резистивного падения напряжения, которое пропорционально квадрату магнитной индукции и содержит 1-ю и 3-ю гармоники. Магнито-резистивное напряжение $U_{\text{мр}}$ зависит от величины отклонения расположения контактов h от строго симметричного. Величина h оценивалась по амплитуде сигнала поперечного напряжения при отключенной обмотке электромагнита. Расчетное значение асимметрии контактов составило около 0,3 мм. Оценка значений $U_{\text{мр}}$ с использованием формулы для слаболегированных полупроводников [7]

$$U_{\text{мр}} = 0,38 \frac{h I_0 \rho}{bd} (\mu B_0)^2, \quad (3)$$

(где ρ – удельное сопротивление образца; b и d – ширина и толщина образца; I_0 и B_0 – амплитудные значения тока и магнитной индукции; μ – подвижность электронов) дает значение $U_{\text{мр}}$ около 100 мкВ для $B_0 \sim 0,2$ Тл, $\rho \sim 10$ Ом · м и $\mu \sim 0,15$ м²/В · с, т. е. менее 1% от наблюдаемой амплитуды сигнала.

Вид такой двойной петли, близкий к наблюдаемому, также получен путем подачи на пластины горизонтального отклонения осциллографа сигнала 3-й гармоники от генератора синусоидальных колебаний. Наиболее вероятной причиной наблюдаемой смены формы фигуры может быть появление гармоник магнитного поля более высоких порядков или значительные изменения фазы магнитного поля из-за нелинейных свойств электромагнита.

На рис. 4 представлена зависимость амплитуды поперечного напряжения от квадрата амплитудного значения тока. Зависимость, полученная путем исключения асимметричной составляющей, имеет вид, близкий к линейной при значениях тока до 0,35 А. Очевидно, в этом диапазоне вклад холловской составляющей в величину поперечного напряжения становится существенным и значительно превышает уровень электромагнитной наводки, что отражается фигурой на рис. 3, б.

Оценка концентрации носителей заряда по наклону линейного участка этой зависимости дает значение $\sim 6 \cdot 10^{19}$ м⁻³.

Таким образом, показано, что для условий данного эксперимента существует диапазон токов, в котором холловская составляющая поперечного напряжения растет быстрее электромагнитной наводки на измерительный контур.

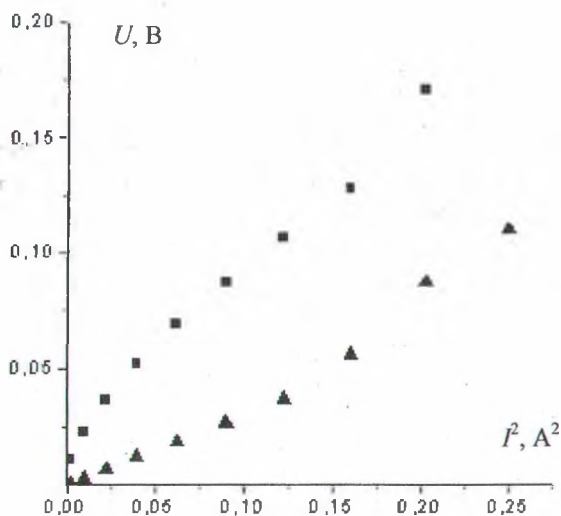


Рис. 4. Зависимость амплитуды поперечного напряжения образца от квадрата амплитудных значений тока. Нижняя кривая получена путем вычитания амплитудных значений осциллограмм при включенном и выключенном магнитном поле

Верхняя граница диапазона измерений определяется значениями тока, при которых начинают сказываться амплитудно-фазовые искажения сигнала вследствие нелинейных свойств электромагнита.

Литература

1. Lengsfeld P., Brehme S., Ehlers G. Et al Hall effect in β -FeSi₂ / Phys.Rev.B., 1998. – V. 58, N 24. – P. 16 154–16 159.
2. Lu Z.Q., Pan G., Lai W.Y. Planar Hall effect in NiFe/NiMn bilayers / J. Appl. Phys, 2001. – V. 90, N 3. – P. 1414–1418.
3. Edmonds K.W., Wang K.Y., Campion R. P. Et al Hall effect and hole densities in Ga_{1-x}Mn_xAs / Appl. Phys. Lett, 2002. – V. 81, N 16. – P. 3010–3012.
4. Hamer H. A new technique for measuring Hall effect coefficient / Semiconductor Prod., 1972. – V. 5, N 6. – P. 26–36.
5. Lavine J. M. Alternate current apparatus for measuring the ordinary Hall coefficient of ferromagnetic metals and semiconductors / Rev. Sci. Instr., 1968. – V. 29, N 11. – P. 970–976.
6. Hatfield H.S. A method of investigating the Hall effect / Proc. Phys. Soc., 1966. – V. 48, N 265. – P. 267–276.
7. Ансельм А. И. Введение в теорию полупроводников. – М.; Л.: Физматгиз, 1962. – 408 с.