

УДК 537.633.2

В. Р. Мадьяров, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики (БГТУ)

ХОЛЛОВСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ В КРЕМНИИ МЕТОДОМ ЧАСТОТНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Предлагается методика бесконтактных холловских измерений, в которой применяются плоские электроды с обеих сторон пластинки из беспримесного кремния. На образец подается синусоидальное напряжение переменной частоты, создающее поперечную холловскую ЭДС в постоянном магнитном поле. Образец с электродами соединяется с катушкой индуктивности, образуя резонансный контур. В качестве регистрируемого сигнала используется резонансное напряжение на частотной развертке, пропорциональное холловской ЭДС. Концентрация носителей, оцененная по измеренной постоянной Холла, согласуется со значением, полученным с использованием данных СВЧ-зондирования и удельной электропроводности. Значение энергии активации, полученное из температурной зависимости постоянной Холла, составило 0,58 эВ.

Hall contactless method is proposed which uses two planar electrodes with symmetrical capacitive connections to a planar undoped silicon sample to be measured. The sample is fed by voltage of varying frequency to form Hall voltage in constant magnetic field. The sample and electrodes are connected to an inductance coil to form a resonant circuit. The value to be measured is the peak voltage on the frequency curves which is proportional to the Hall voltage. Studies show that carrier concentration and values are in good agreement with those obtained from intrinsic conductivity and mobility values measured using microwave technique. Activation energy obtained from temperature studies is 0,58 eV.

Введение. Результативность холловских измерений в значительной степени зависит от качества омических контактов, которыми к исследуемому образцу присоединяются токоведущие проводники и выводы для подачи сигнала на измерительную аппаратуру. Формирование холловских измерительных контактов, как правило, представляет технически сложную задачу. Наряду с этим, при использовании омических контактов появляются побочные термоЭДС и ЭДС асимметрии, которые понижают точность измерений, так как могут быть сравнимыми с холловской ЭДС. В этой связи перспективными представляются холловские измерения, в которых применяется емкостная связь образца с измерительными выводами. Бесконтактный холловский метод использовался для изучения переноса горячих электронов в невырожденных полупроводниках при низких температурах с помощью высоковольтных импульсов [1, 2], показана применимость такого метода для полупроводниковых материалов в широком диапазоне подвижностей носителей заряда.

В данной работе приводятся результаты частотно-емкостных холловских измерений на образце кремния с удельным сопротивлением около 20 мОм·м (при температуре 293 К). Применение переменного тока (или магнитного поля) при наличии емкостной связи с измерительной цепью позволяет устранить вклад от напряжения неэквипотенциальности и термоЭДС.

Основная часть. Схема измерений представлена на рис. 1. На образец 1, который помещался в зазор сердечника электромагнита постоянного тока, подавалось напряжение синусоидальной формы переменной частоты. Для исследований

использовался образец беспримесного кремния. Размеры образца составляли 20×3×0,5 мм.

Под действием постоянного магнитного поля поперек образца 1 формировалась синусоидальная холловская ЭДС. Вследствие емкостной связи на электродах 2 возникали колебания напряжения, амплитуда которого зависит от холловской ЭДС. Сигнал переменной частоты формировался генератором качающейся частоты 6 (ГКЧ).

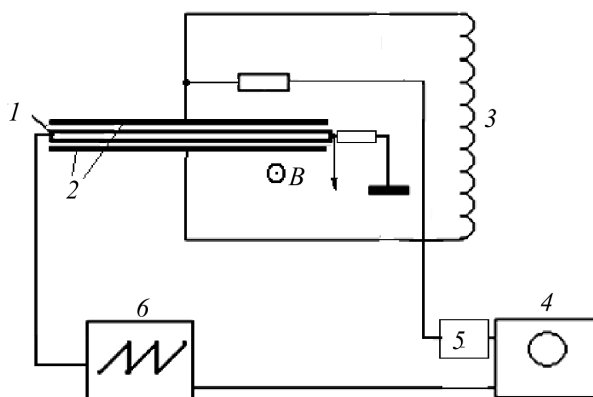


Рис. 1. Схема измерений:

- 1 – образец; 2 – электроды; 3 – катушка;
4 – осциллографический индикатор;
5 – частотный детектор; 6 – ГКЧ

Для дополнительного усиления сигнала использовался резонансный контур, образованный емкостями измерительных электродов 2 и катушкой индуктивности 3 с воздушным сердечником. Электроды 2 наклеивались на образец через термостойкую изолирующую пленку толщиной 10 мкм, образуя с образцом емкость ~370 пФ. Регистрация напряжения на контуре

обеспечивалась осциллографическим индикатором 4. Развертка индикатора запускалась периодическим пилообразным сигналом от ГКЧ. Пилообразное напряжение обеспечивало также синхронное изменение частоты выходного сигнала ГКЧ и появление на экране индикатора профилей частотных разверток напряжения на колебательном контуре. В качестве измеряемого напряжения использовалось амплитудное значение на резонансных кривых. Для контроля временной формы напряжения индикатор переключался в режим осциллографирования.

На рис. 2 приведены осциллограммы напряжения на измерительном колебательном контуре при выключенном магнитном поле и при магнитной индукции 0,25 Тл. Значительное увеличение сигнала при включении магнитного поля позволяет интерпретировать этот сигнал как обусловленный колебаниями холловской ЭДС. При отсутствии магнитного поля наблюдаются колебания вследствие емкостных связей образца с измерительными электродами.

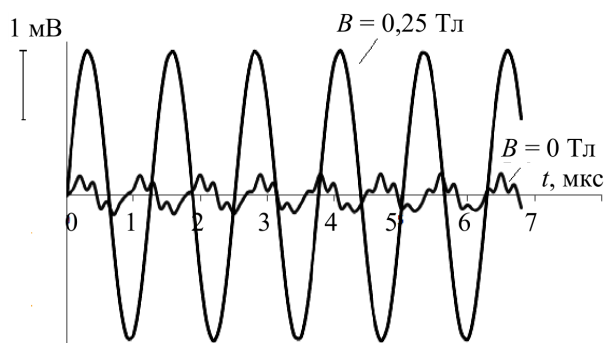


Рис. 2. Осциллограммы напряжения на измерительном контуре при выключенном магнитном поле и при магнитной индукции 0,25 Тл

Для проверки влияния параметров контура на регистрируемый сигнал проводились измерения резонансных кривых при различных значениях индуктивности. На рис. 3 представлены частотные развертки напряжения на образце при различных значениях магнитной индукции поля, в которое помещен образец, и индуктивности измерительного контура. При большей индуктивности L контура снижается резонансная частота и возрастает резонансное напряжение. Также наблюдается уменьшение ширины кривой из-за увеличения добротности измерительного контура.

На рис. 4 и 5 приведены зависимости поперечного напряжения U_{\perp} на образце от магнитной индукции B и тока I . Значение поперечного напряжения вычислялось по формуле

$$U_{\perp} = \frac{U_p - U_0}{k}, \quad (1)$$

где U_p – резонансное напряжение, определяемое из частотных разверток; U_0 – напряжение при отсутствии магнитного поля ($B = 0$ Тл) на частоте резонанса. Напряжение U_p , соответствующее максимуму резонансной кривой, находилось путем подачи калибровочного синусоидального сигнала U_k известной амплитуды на прямоугольный образец из фольгированного гетинакса, размеры которого равны размерам исследуемого образца. Фольгированные грани соединялись через сопротивление, равное сопротивлению образца ($\sim 0,15$ Ом). Наблюдалась линейная зависимость резонансного напряжения от U_k ($U_p = kU_k$). Значение коэффициента k , определенного из этой зависимости, составило $k \approx 7$. Это значение использовалось для расчета холловского напряжения на образце по пиковым значениям резонансных кривых.

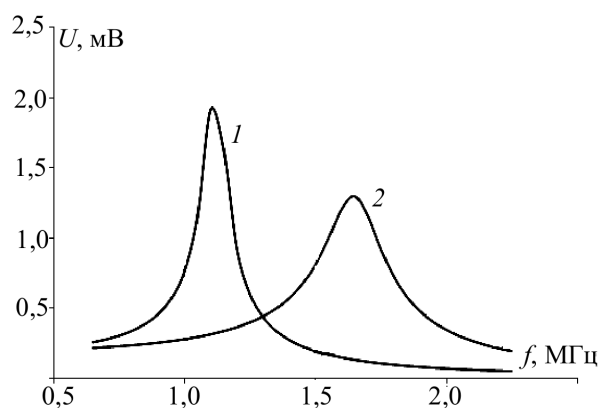


Рис. 3. Типичные частотные развертки напряжения на образце, помещенном в магнитное поле с индукцией 0,2 Тл, при индуктивности катушки измерительного контура: 1 – 40 мкГн; 2 – 16 мкГн

Как видно из рис. 4 и 5, зависимости поперечного напряжения близки к линейным. Оценки величин $R_H = (b/B)(\Delta U_{\perp} / \Delta I)$, или $R_H = (b/I)(\Delta U_{\perp} / \Delta B)$ ($b = 3$ мм – размер образца в направлении, параллельном магнитной индукции), по наклону этих зависимостей дают близкие значения. Это позволяет интерпретировать R_H как постоянную Холла, которая обратно пропорциональна собственной концентрации носителей заряда в образце. Для беспримесного невырожденного полупроводника R_H определяется следующей формулой [3]:

$$R_H = \frac{r}{ne} \frac{1 - \beta}{1 + \beta}, \quad (2)$$

где r – Холл-фактор, зависящий от механизма рассеяния носителей (для рассеяния на тепловых колебаниях решетки $r = 3\pi/8$); n – концентрация носителей заряда; e – элементарный заряд; β – отношение подвижностей электронов и ды-

рок, $\beta = \mu_n / \mu_p$. Если проводимость беспримесного образца обусловлена только рассеянием носителей на колебаниях решетки, то значение β можно найти как отношение эффективных масс дырки и электрона в степени 5/2. Тогда оценка с помощью формулы (2) собственной концентрации носителей при температуре 293 К дает $n \sim 3 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Это значение хорошо согласуется с величиной, рассчитываемой по формуле

$$n = \frac{1}{\rho e \mu}, \quad (3)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление образца; μ – подвижность носителей заряда в образце.

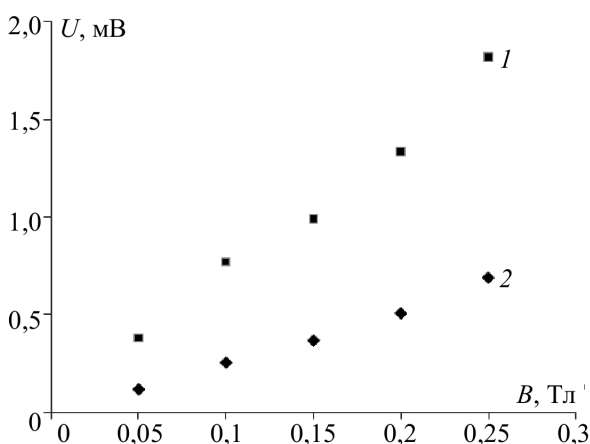


Рис. 4. Зависимости поперечного напряжения на образце от магнитной индукции при значениях тока, проходящего через образец: 1 – 1 мА; 2 – 0,4 мА

Для расчета по формуле (3) использовалось значение $\mu = 0,23 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, полученное из измерений угла поворота плоскости поляризации СВЧ-волны при температуре 293 К [4].

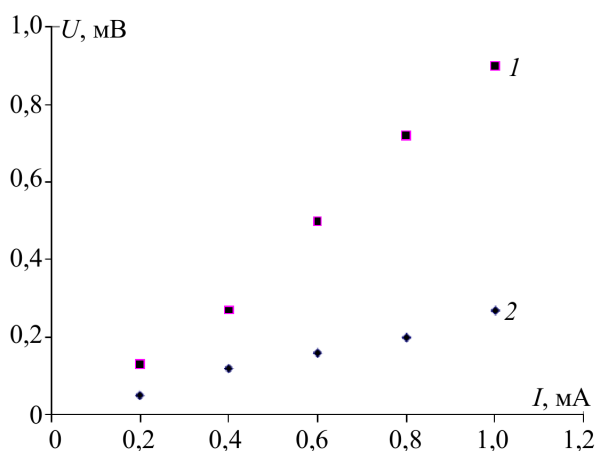


Рис. 5. Зависимости поперечного напряжения на образце от тока при значениях магнитной индукции: 1 – 0,25 Тл; 2 – 0,1 Тл

На рис. 6 приведена зависимость значения R_H , определенного по резонансным кривым, от обратной температуры в диапазоне 290–410 К. Оценка энергии активации ΔE_a по наклону этой зависимости дает значение 0,58 эВ, хорошо согласующееся с известным значением ΔE_a для беспримесного кремния (0,55 эВ).

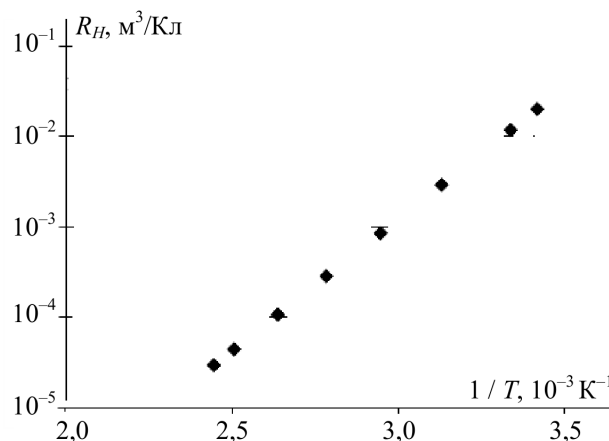


Рис. 6. Зависимость постоянной Холла от обратной температуры

Заключение. Показана применимость бесконтактного метода холловских измерений для полупроводниковых образцов с удельным сопротивлением 20 мОм · м. Реализация бесконтактного метода холловских измерений существенно упрощается при использовании резонансной измерительной схемы в сочетании со сканированием по частоте. Концентрация носителей, оцененная по измеренной постоянной Холла, согласуется со значением, полученным с использованием данных СВЧ-зондирования и удельной электропроводности. Значение энергии активации, полученное из температурной зависимости постоянной Холла, составило 0,58 эВ.

Литература

1. Komiyama, S. A Capacitive Method for Hall Effect Measurement / S. Komiyama // Appl. Phys. – 1981. – Vol. 25, № 3. – P. 303–305.
2. Contactless Measurement of Semiconductor Mobility / F. Horiguehi [et al.] // Jap. J. Appl. Phys., Supplement 18–1. – 1979. – Vol. 18, № 1. – P. 165–171.
3. Кучис, Е. В. Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования / Е. В. Кучис. – М.: Сов. радио, 1990. – 263 с.
4. Мадьяров, В. Р. Микроволновые холловские измерения в кремнии при комнатной температуре / В. Р. Мадьяров // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информатика. – 2009. – Вып. XVII. – С. 99–102.

Поступила 26.02.2011