

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТА ХОЛЛА С КОНЦЕНТРАТОРАМИ МАГНИТНОГО ПОТОКА КАК ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

Шилагарди Г. \*, Ярмолевич В.А. \*\*, Прокошин В.И. \*\*\*,  
Цооху Х. \*, Нямдулам Р. \*, Д. Тимурбаатар.

\*Монголия, Монгольский национальный университет, \*\* Республика Беларусь, Белорусский государственный университет, \*\*\* Республика Беларусь, Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований

\*Э-почта: gshilagardi@yahoo.com

\*\*Э-почта: mail.ru@vgs-05

### ТОВЧ АГУУЛГА

Энэ ажилд сул соронзон оронг хэмжихийн тулд хэрэглэгдэх ферросоронзон материалаар үйлдсэн соронзон өтгөрүүлэгчийг зохион бүтээх оптималь горимыг ( $k = \vec{B}^*/\vec{B}$ ) олж тогтоох онолын үндсийг боловсруулжээ.

Наибольшее распространение получили концентраторы, выполненные в виде осесимметричных фигур (длинные стержни, в том числе конусообразные или с закруглением и т.п.), а так же плоские концентраторы магнитного потока. Дилемма создания микроэлектронных сенсоров квазистатических магнитных полей с ферромагнитными концентраторами заключается в значительном уменьшении коэффициента усиления магнитного потока  $k$  внешнего магнитного поля  $B$  с уменьшением геометрической длины концентраторов ( $B^*$  – индукция магнитного поля в зазоре концентраторов где установлен преобразователь Холла), определяемого как:

$$k = B^*/B \quad (1)$$

Для получения высоких значений  $k$  в сочетании с требованием к миниатюризации необходима оптимизация геометрических размеров концентраторов, их формы, зазора с увязкой магнитных свойств материала концентратора.

Коэффициент усиления  $k$  магнитного потока (или индукции магнитного поля) является главной характеристикой концентратора. Основной задачей при проектировании концентраторов магнитного потока любой конфигурации является достижение высоких значений  $k$  при миниатюризации геометрических размеров концентратора. При этом к концентратору предъявляются следующие основные требования [1]:

а) значение коэффициента усиления  $k$  в слабых полях стремиться к максимуму, а геометрические размеры – к минимуму;

б) величина индукции магнитного поля ( $k \cdot B$ ) практически не изменяется в месте расположения элемента Холла, т.е. все части элемента Холла находятся в однородном поле;

в) высокая воспроизводимость усиления магнитного потока, что требует применения материалов с низкой коэрцитивной силой, а также с высокой начальной магнитной проницаемостью, обладающей повышенной временной стабильностью;

г) высокий порог величины индукции внешнего магнитного поля, при котором концентратор входит в режим насыщения;

д) при функционировании в переменных электромагнитных полях – широкий частотный диапазон.

Естественно, что подобрать единственный материал и миниатюрные размеры на все случаи использования концентраторов в сенсорах магнитных полей крайне затруднительно, а вот установить взаимосвязи и влияния геометрических размеров, конфигурации и магнитных свойств на прохождение магнитного потока по концентратору представляется важной задачей для понимания принципов проектирования и оптимизации сенсоров.

В связи с вышеизложенным, была разработана физическая модель элемента Холла

с концентраторами магнитного потока как четырехполюсника. Обозначим высоту пленочного элемента Холла  $d$ , а расстояние между концентраторами магнитного потока  $2D$ . К выходным клеммам ЭДС Холла может быть подключена электрическая нагрузка  $R_L$ .

При заданной магнитной индукции  $B$  внутри пленки, потенциалы  $U_1$  и  $U_2$  в магниточувствительном элементе Холла являются линейными функциями токов  $J_1$  и  $J_2$ , так что для четырехполюсника (Рисунок 1) справедливы следующие уравнения, записанные с использованием  $Z$  параметров [2]:

$$\begin{aligned} U_1 &= Z_{11}J_1 + Z_{12}J_2 \\ U_2 &= Z_{21}J_1 + Z_{22}J_2 \end{aligned} \quad (2)$$

Стрелки на рисунке 1 указывают положительные направления тока и разности потенциалов. Так как полное сопротивление  $Z$  не содержит реактивной составляющей, то уравнения могут быть записаны с использованием активного электросопротивления  $R_{ij}$ . С учетом того, что четырехполюсник считается необратимым, выражения (2) можно записать, аналогично, как и для обыкновенного датчика Холла [3].

$$\begin{aligned} U_1 &= R_{11}(k \cdot B)J_1 - R_{12}(k \cdot B)J_2 \\ U_2 &= R_{21}(k \cdot B)J_2 + R_{22}(k \cdot B)J_1 \end{aligned} \quad (3)$$

Где все коэффициенты  $R_{ij}$  положительны и являются функциями магнитной индукции  $k \cdot B$ , в зазоре магнитомягкого концентратора магнитного потока. Эти коэффициенты имеют одинаковую размерность [Ом] и простой физический смысл.  $R_{11} = U_1 / J_1$  (при  $J_2 = 0$ ) - входное сопротивление ненагруженного датчика (четыреполюсника),  $R_{22} = U_2 / J_2$  (при  $J_1 = 0$ ) - выходное сопротивление при разомкнутом входе,  $R_{21} = U_2 / J_1$  (при  $J_2 = 0$ ) - чувствительность датчика к магнитному полю в режиме холостого хода.

Как и для обычного датчика Холла изменение полярности магнитного поля ведет к изменению знаков  $R_{12}$  и  $R_{21}$ , т.е. выполняются условия

$$R_{12}(-k \cdot B) = -R_{12}(k \cdot B)$$

$$R_{21}(-k \cdot B) = -R_{21}(k \cdot B) \quad (4)$$

Из экспериментов следует, что в интервале внешних магнитных полей  $B \leq 3$  мТл для датчиков Холла из антимонида индия и плоских концентраторов магнитного потока с характерными значениями  $k$  в интервале (10-20) единиц  $R_{11}$  и  $R_{22}$  слабо зависят от  $B$ . Их относительные изменения не превышают 3%. Учитывая, что  $R_{12} \approx R_{21} \ll R_{11} \approx R_{22}$ , поэтому  $R_{11}(B)$  и  $R_{22}(B)$  можно заменить их значениями при  $B=0$ , а именно

$$\begin{aligned} R_{11}(0) &\text{ и } R_{22}(0) \\ R_{11}(k \cdot B) &= R_{11}(0) \\ R_{22}(k \cdot B) &= R_{22}(0) \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, система (3), дополненная равенствами (1), (4) и (5) описывает параметры датчика Холла с плоскими концентраторами магнитного потока (при слабых внешних магнитных полях). При  $k \cdot B \rightarrow B_s$ , где  $B_s$  - индукция технического насыщения концентраторов магнитного потока равенства (5) необходимо исключить из рассмотрения.

Если датчик выполнен строго симметричным, то  $R_{11} = R_{22}$  и  $R_{12}(k \cdot B) = R_{21}(k \cdot B)$ . В реальном датчике эти условия могут выполняться лишь приближенно.

В четырехполюснике, описываемом уравнениями (3) имеет место взаимное влияние входной и выходной цепей друг на друга. При подключении к выходным клеммам справа нагрузки  $R_L$ , зависимость к.п.д.  $\eta(R_L)$  определяется так же как и для обычного датчика Холла, функционирующего без концентраторов магнитного потока.

$$\eta(R_L) = U_2 J_2 / (U_1 J_1) \quad (6)$$

Зависимость к.п.д. от сопротивления нагрузки так же может быть рассчитана из уравнений четырехполюсника:

$$\eta(R_L) = R_{21}^2 R_L / [(R_{11} R_{22} + R_{12} R_{21} + R_{11} R_L)(R_{22} + R_L)] \quad (7)$$

Важными параметрами четырехполюсника являются  $\alpha = J_2 / J_1$  - коэффициент передачи по току,  $\beta = U_2 / U_1$  - коэффициент передачи по напряжению.

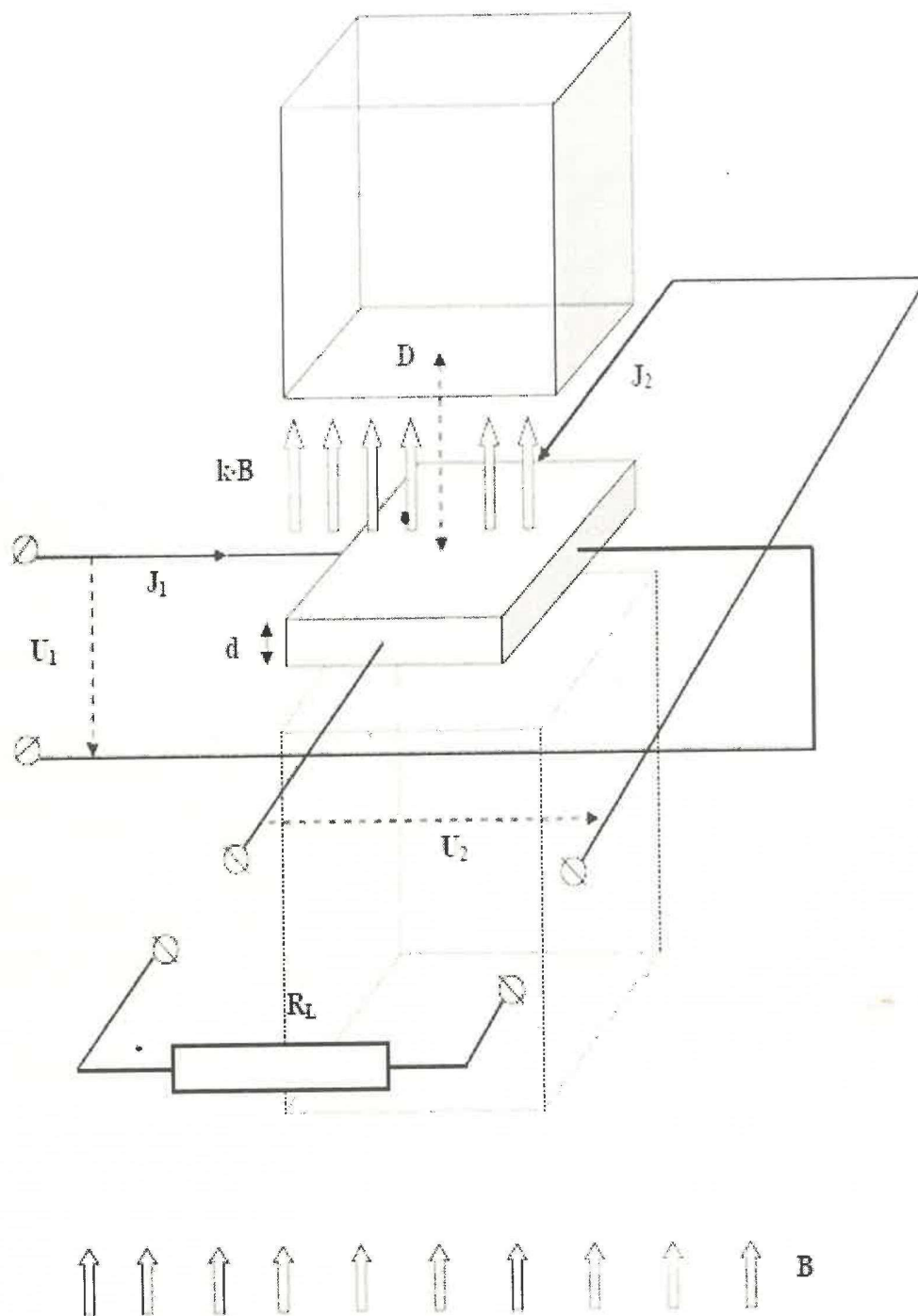


Рисунок 1 – Четырехполюсник



На рисунке 2 приведены зависимости  $R_{11} = R_{22}$  от индукции внешнего магнитного поля  $B$  при  $k=20$  для полупроводникового датчик Холла из InSb при  $d = 7,2$  мкм ;  $J_1 = 50$  мА.

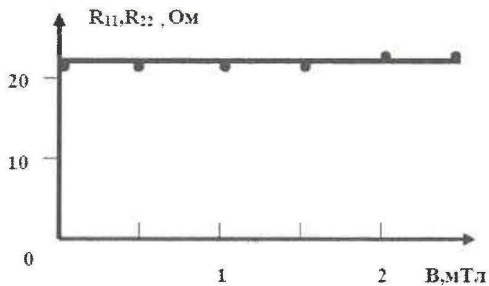


Рисунок 2

На рисунке 3 приведены зависимости  $R_{12} = R_{21}$  от индукции внешнего магнитного поля  $B$  при  $k=20$  для полупроводникового датчик Холла из InSb при  $d = 7,2$  мкм ;  $J_1 = 50$  мА.

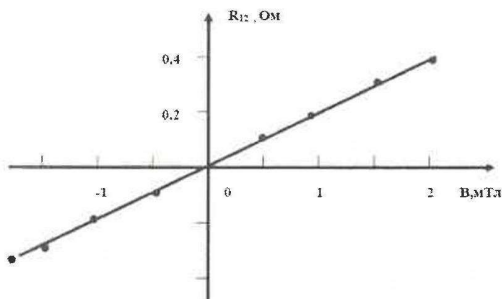


Рисунок 3

Коэффициент передачи по току  $\alpha$  можно найти по формуле:

$$\alpha = J_2/J_1 = -R_{21}/(R_{22} + R_L) \quad (8)$$

Коэффициент передачи по напряжению  $\beta$  можно найти по формуле:

достигается максимальное значение к.п.д. лежит в интервале от  $R_{22}$  до  $\sqrt{2} R_{22}$ .

$$\beta = U_2/U_1 = -R_{21}R_L / (R_{11}R_{22} + R_{12} + R_{21} + R_{11}R_L) \quad (9)$$

Зависимость к.п.д. четырехполюсника от электросопротивления нагрузки, точнее от отношения  $R_L/R_{22}$  приведено на рисунке 4.

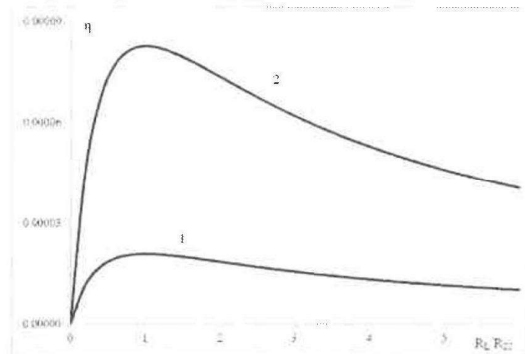


Рисунок 4. - Зависимость  $\eta$  при  $k=20$  для полупроводникового датчик Холла из InSb при  $d = 7,2$  мкм ;  $J_1 = 50$  мА от отношения  $R_L/R_{22}$  ( $V=1$  мТл – линия 1,  $V=2$  мТл – линия 2)

На рисунках 5 и 6 изображены соответственно зависимости коэффициентов передачи по току  $\alpha$  и по напряжению  $\beta$  при  $k=20$  для полупроводникового датчик Холла из InSb при  $d = 7,2$  мкм ;  $J_1 = 50$  мА от отношения  $R_L/R_{22}$ .

По абсолютной величине коэффициент  $\beta$  увеличивается с ростом электросопротивления нагрузки  $R_L$ , а коэффициент  $\alpha$  уменьшается. Так как  $\eta = \alpha \cdot \beta$ , то линия, описывающая зависимость к.п.д.  $\eta(R_L)$  характеризуется максимумом.

Из рисунка 4 и формулы 7 следует, что датчика Холла оптимальное сопротивление нагрузки, при котором

Из приведенных рисунков 4-6 следует, что с увеличением внешнего магнитного поля наблюдается рост по абсолютной величине параметров четырехполюсника  $\eta, \alpha, \beta$ .

СПИСОК ЦИТИРУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

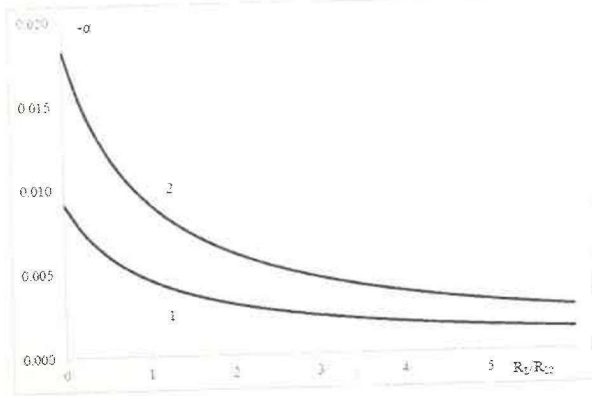


Рисунок 5. - Зависимость коэффициента передачи по току  $\alpha$  при  $k=20$  для полупроводникового датчик Холла из InSb при  $d = 7,2$  мкм ;  $J_1 = 50$  мА от отношения  $R_1 / R_{22}$  ( $V=1$  мТл –линия 1,  $V=2$  мТл–линия 2)

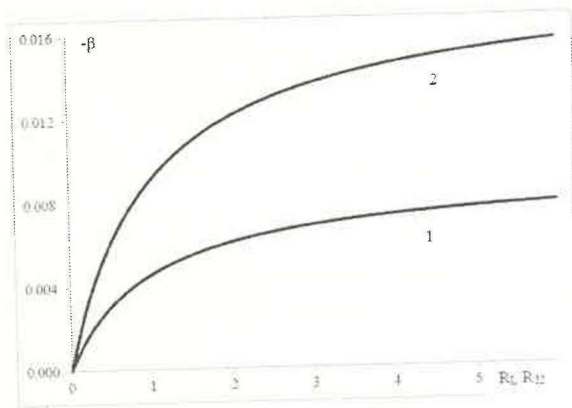


Рисунок 6. - Зависимость коэффициента передачи по напряжению  $\beta$  при  $k=20$  для полупроводникового датчик Холла из InSb при  $d = 7,2$  мкм ;  $J_1 = 50$  мА от отношения  $R_1 / R_{22}$  ( $V=1$  мТл –линия 1,  $V=2$  мТл–линия 2 )

1. Буслов И., Бауткин В., Драпезо А., Ярмолович В. Магнитомягкие концентраторы магнитного потока для сенсоров слабых магнитных полей // Электроника, №1, 2011, С.31-35.
2. Вайсс Г. Физика гальваномагнитных полупроводниковых приборов. М., Энергия, 1974, 384 с.
3. Анищик В.М., Ярмолович В.А., Исследование параметров датчика, функционирующего на планарном эффекте Холла, как четырехполосника // Вестник БГУ, 1998 г., сер. 1 , №3 , С.45-49 .