

## МОСТОВЫЕ ДАТЧИКИ НА ОСНОВЕ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

## МОСТОВІ ДАТЧИКИ НА ОСНОВІ ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ

## BRIDGE SENSORS BASED ON FIELD-EFFECT TRANSISTORS

**Аннотация.** Рассмотрена возможность использования полевых транзисторов в мостовых датчиках магнитного поля, температуры и света. Показано, что максимальная чувствительность достигается в мостовых схемах датчиков, где в качестве всех четырех элементов в плечах моста используются полевые транзисторы, причем у одной пары транзисторов ток увеличивается с ростом измеряемой величины, а у другой – уменьшается.

**Анотація.** Розглянуто можливість використання польових транзисторів у мостових датчиках магнітного поля, температури та світла. Показано, що максимальна чутливість досягається в мостових схемах датчиків, де в якості всіх чотирьох елементів в плечах моста використовуються польові транзистори, причому в одній парі транзисторів струм збільшується зі зростанням вимірюваної величини, а в іншій – зменшується.

**Summary.** Possibility of the use of the field transistors is considered in the bridge sensors of the magnetic field, temperature and light. It is shown that maximum sensitivity is attained in the sensor bridge circuit, where the elements in the four arms of the bridge field effect transistors are used, and one pair of transistors current increases with the growth measured value, and the other - is decreased.

Основой измерительных систем являются первичные датчики (сенсоры). Они преобразуют входные физические величины (температура, давление, освещенность, магнитный поток, ускорение и т.д.) в пропорциональный электрический выходной сигнал [1]. Для параметрических датчиков характерно изменение параметров электрических, магнитных, оптических цепей – сопротивления, индуктивности, емкости, пропускание света и др. Они являются пассивными (т.е. позволяют косвенно судить о физической величине путем включения датчика в электрическую цепь) и нуждаются в подведении питания. В таких датчиках наиболее часто используется эффект изменения активного сопротивления (терморезистивный, фоторезистивный и магниторезистивный эффекты), изменение диэлектрической проницаемости, изменение пропускания света и т.д. При подключении резистивных датчиков во многих случаях используются мостовые схемы. В таких измерительных схемах устраняется главный недостаток большинства измерительных схем с делителями напряжения – наличие ненулевого выходного сигнала при отсутствии сигнала на входе измерительной цепи. Мостовая измерительная схема имеет два плеча – измерительное, в которое включается параметрический датчик, и опорное. При подключении моста на одну диагональ его подается напряжение, а с другой снимается выходной сигнал. В режиме неравновесного моста в исходном состоянии мост уравнивается, т.е. выходной сигнал устанавливается равным нулю. При последующем отклонении сопротивлений (импедансов) от первоначальных значений формируется выходной сигнал, отличный от нуля. В зависимости от количества измерительных преобразователей (первичных сенсоров) различают четверть-мостовые, полумостовые и полномостовые схемы датчиков. Для уменьшения нелинейности выходной характеристики применяют дифференциальное включение в мостовую схему измерительных преобразователей, имеющих противоположные по знаку чувствительности [2]. Недостатком известных резистивных (импедансных) датчиков является их небольшая чувствительность к слабым входным сигналам.

**Целью настоящей статьи** является рассмотрение возможности повышения чувствительности параметрических датчиков на основе мостовых схем путем использования элементов с внутренним усилением (полевых транзисторов).

**1. Датчики магнитного поля.** В полупроводнике, помещенном в магнитное поле, действует эффект магнитосопротивления, состоящий в уменьшении подвижности носителей заряда, а, соответственно, и в увеличении электрического сопротивления материала. Это в полной мере относится и к каналу полевого транзистора (ПТ), помещенного в поперечное магнитное поле [3]. В этом случае, как и в магниторезисторе, длина канала должна быть много меньше его ширины. Такому

условию удовлетворяет, например, транзистор типа КП-303 с каналом  $n$ -типа и  $p$ - $n$ -переходом в качестве затвора. При работе ПТ в качестве первичного преобразователя, он обычно включается как двухполюсник (затвор замкнут с истоком, напряжение на затворе  $U_3 = 0$ ). В этом случае ток насыщения ПТ определяется как

$$I_H = An^2 \mu, \quad (1)$$

где  $n$ ,  $\mu$  – концентрация и подвижность носителей заряда в канале;  $A$  – постоянная, определяемая геометрическими и электрическими параметрами канала, зависящими от напряжения [4]. Изменение тока  $I_H$  таких ПТ в магнитном поле с индукцией до 0,5 Тл составляет около 1 %, и в данном случае в качестве выходного параметра датчика практического интереса не представляет.

В качестве датчика предпочтительна схема из двух ПТ, один из которых является магниточувствительным элементом (ПМТ), а второй ПТ играет роль нагрузки (рис. 1).

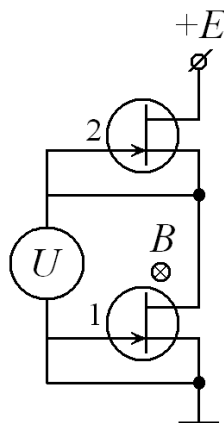


Рисунок 1 – Схема из двух полевых транзисторов: 1 – ПМТ; 2 – ПТ

Вольтамперные характеристики (ВАХ) ПМТ с такой нагрузкой и нагрузочная кривая показаны на рис. 2. Здесь  $E$  – напряжение питания. Вследствие малого наклона ВАХ к оси напряжений на участке насыщения тока, при небольших изменениях тока насыщения напряжение на ПМТ изменяется достаточно сильно (от  $U_0$  до  $U_B$ ). Для схемы датчика подбираются два ПТ с одинаковым током насыщения. В отсутствие магнитного поля (индукция  $B = 0$ ) напряжение источника питания  $E$  делится пополам между двумя ПТ и  $U_0 = E/2$ . При помещении ПМТ в поперечное относительно направления тока магнитное поле сопротивление канала растет, а ток насыщения уменьшается. Это приводит к росту напряжения на ПМТ до величины  $U_B$ . В отличие от магниторезисторов, при этом действует внутренний механизм увеличения чувствительности. Причиной этого является то, что сопротивление любого ПТ на участке насыщения ВАХ растет с увеличением напряжения, так как с ростом напряжения  $U$  ток  $I_H$  слабо увеличивается. Таким образом, увеличение сопротивления канала ПМТ в магнитном поле приводит к росту падения напряжения  $U_B$ , а это вызывает дополнительное увеличение сопротивления канала и рост  $U_B$ .

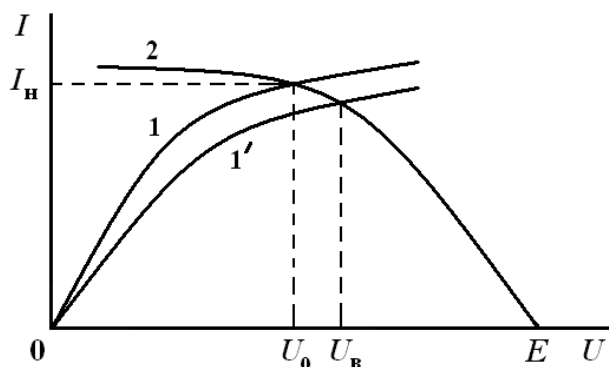


Рисунок 2 – Вольтамперные характеристики ПМТ: 1 – при отсутствии магнитного поля; 1' – при действии магнитного поля; 2 – нагрузочная кривая

Для того, чтобы напряжение на выходе датчика отсчитывалось от нуля, используется мостовая схема (рис. 3), где к паре транзисторов ПМТ добавлена вторая пара ПТ (нагрузочные ПТ). Два ПМТ расположены в противоположных плечах моста, нагрузочные ПТ – также в противоположных плечах. Подстроечный переменный резистор  $R_{\Pi}$  служит для точной установки нуля (балансировки моста) при отсутствии магнитного поля. Кроме очевидного удвоения магниточувствительности (по сравнению с одним чувствительным элементом), такая полумостовая схема из четырех ПТ (два из которых проявляют магниточувствительность) позволяет устранить температурный дрейф нуля выходного напряжения и уменьшить температурный коэффициент магниточувствительности до значений, меньших  $0,1\%/^{\circ}\text{C}$ . На рис. 4 приведена зависимость выходного напряжения  $U$  от магнитной индукции  $B$ . Видно, что это напряжение увеличивается с ростом индукции  $B$  и увеличением напряжения источника питания  $E$ . Величина магниточувствительности  $\gamma = U/I \cdot B$  мостовых датчиков на основе ПТ составляет  $\sim 5 \cdot 10^3 \text{ В/А} \cdot \text{Тл}$ , что в 50 раз больше, чем у кремниевых датчиков Холла. Также отметим, что в противоположность магниторезисторам, магниточувствительность датчика на основе ПТ максимальна в области слабых магнитных полей, в то время, как у магниторезисторов – минимальна.

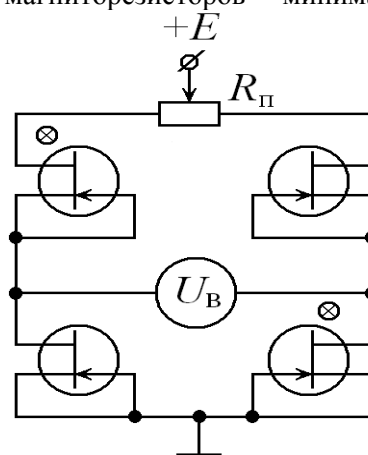


Рисунок 3 – Мостовая схема магниточувствительного датчика

Если оба ПМТ (рис. 4) поместить в неоднородное магнитное поле, то выходной сигнал будет пропорционален разности индукций магнитного поля в двух точках, где находятся каналы ПТ. Такой датчик может быть использован для измерения градиента неоднородного магнитного поля.

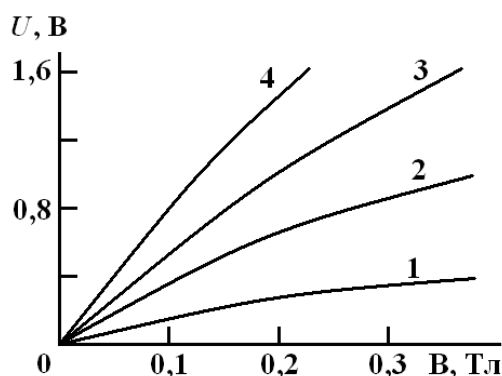


Рисунок 4 – Зависимость выходного напряжения от магнитной индукции.  
Напряжение источника питания  $E$ , В: 1 -10 , 2 -15 , 3 -20 , 4 -25

**2. Датчики температуры.** Полевые транзисторы можно использовать в качестве датчиков температуры. Максимальную чувствительность мостового датчика можно получить, если использовать в качестве всех четырех составляющих элементы, чувствительные к измеряемой величине и имеющие противоположные по знаку чувствительности (рис. 5). У первой пары элементов, расположенных в противоположных плечах моста, ток должен уменьшаться с ростом этой

величины, а у другой пары в других плечах – увеличиваться. Напряжение сигнала в измерительной диагонали моста для такой схемы включения первичных преобразователей

$$U = 2 \frac{E \Delta R}{R}, \quad (2)$$

здесь  $E$  – напряжение питания моста;  $R$  – сопротивление канала транзистора в цепи “исток-сток”;  $\Delta R$  – изменение этого сопротивления при изменении температуры. В качестве первой пары использовались полевые транзисторы ( $T_1$ ) типа 2ПС202 с  $p$ - $n$ -переходом в качестве затвора. У них ток насыщения  $I_H$  снижается с ростом температуры вследствие уменьшения подвижности носителей заряда в канале [3]. В качестве второй пары подключали МДП-транзисторы ( $T_2$ ) типа КП-305. У них ток  $I_H$  увеличивается с ростом температуры. Происходит это вследствие увеличения напряжения отсечки затвора при изменении заряда на поверхностных состояниях под затвором [4].

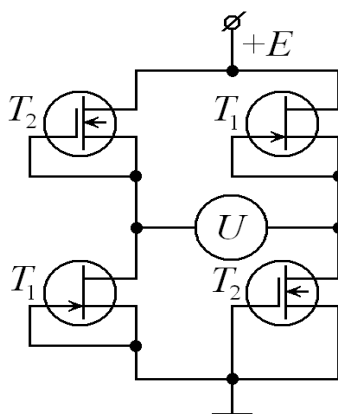


Рисунок 5 – Мостовой датчик температуры

Расширить линейный диапазон  $U = f(T)$  можно введением в цепь истока каждого ПТ резистора  $R_{и}$ . На рис. 6 показана зависимость выходного напряжения моста, сбалансированного при температуре  $T = 0^\circ\text{C}$ . Чувствительность моста  $\sim 1 \text{ В}/^\circ\text{C}$  при напряжении источника питания  $E = 20 \text{ В}$  и  $R_{и} = 0$  в диапазоне температур  $(-10\dots+10)^\circ\text{C}$  (кр. 1). Вне этого диапазона чувствительность уменьшается и увеличивается нелинейность зависимости  $U = f(T)$ .

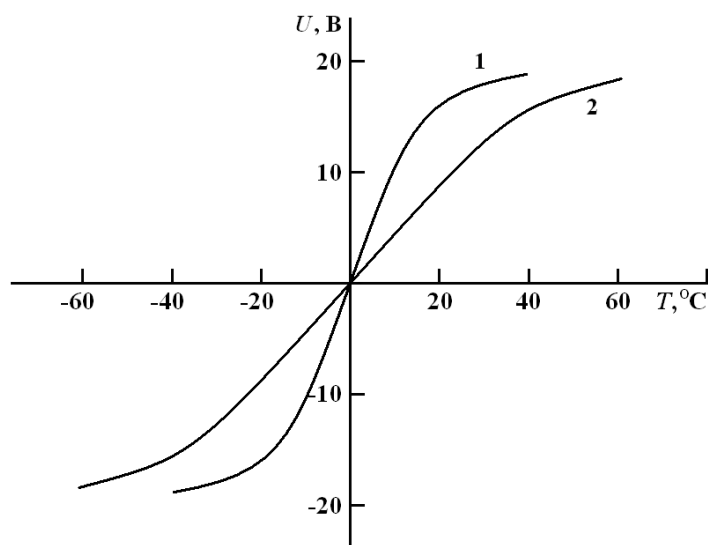


Рисунок 6 – Зависимость выходного напряжения от температуры.  
Сопротивление резистора в цепи истока ПТ  $R_{и}$ , кОм: 1 – 0; 2 – 1

При  $R_H = 1$  кОм зависимость  $U = f(T)$  линейна в диапазоне  $-35...+35$ , чувствительность при этом снижается до  $0,3$  В/°С (кр. 2). Эти же резисторы могут быть использованы для балансировки моста при любой заданной температуре. Установлено, что термочувствительность моста на основе ПТ 10...100 раз выше чувствительности мостовых датчиков на основе других элементов [5].

**3. Фотоприемное устройство.** Полномостовая модель датчика, в которой ток, протекающий через одну пару ПТ, растет при внешнем воздействии, а через другую – уменьшается, можно использовать и при создании фотоприемного устройства (ФПУ). На рис. 7 приведены структуры двух типов полевых МДП-фототранзисторов (ФТ). Транзистор первого типа ФТ<sub>1</sub> (рис. 7,а) представляет собой обычный полевой МДП-транзистор (структура метал-диэлектрик-полупроводник) со встроенным каналом на основе полупроводника  $n$ -типа проводимости (канал) с двумя контактами (И – исток, С – сток), с диэлектриком (Д) и металлическим затвором (З), замкнутым с истоком [6]. При освещении структуры со стороны полупрозрачного металлического затвора З, свет поглощается в канале, концентрация носителей заряда в нем увеличивается и ток через транзистор ФТ<sub>1</sub> увеличивается. Освещение ФТ<sub>1</sub> можно также производить с противоположной стороны канала, т.е. со стороны подложки.

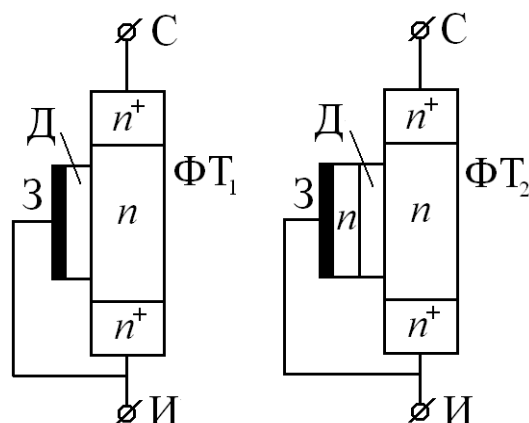


Рисунок 7 – Полевой МДП-транзистор со встроенным каналом (а), с полупроводником  $n$ -типа между затвором и диэлектриком (б)

Транзистор второго типа ФТ<sub>2</sub> (рис. 7,б) отличается тем, что между металлическим слоем затвора и диэлектриком расположен слой полупроводника  $n$ -типа. Контакт металл-полупроводник (затвор) представляет собой диод Шоттки (ДШ). При освещении этой структуры со стороны полупрозрачного металла в ДШ возникает фото-эдс: "плюс" – на металле, "минус" – на полупроводнике. Это фото-эдс играет роль входного сигнала для транзистора ФТ<sub>2</sub> и уменьшает концентрацию носителей заряда в канале. Вследствие этого ток через транзистор ФТ<sub>2</sub> при освещении уменьшается. В данном случае весь свет поглощается в  $n$ -слое затвора и к каналу не доходит.

Работа датчика объясняется с помощью эквивалентной схемы (рис. 8). Когда освещение отсутствует, сопротивление всех фототранзисторов в плечах моста одинаково. Напряжение питания  $E$  распределяется поровну между ФТ<sub>1</sub> и ФТ<sub>2</sub>, потенциалы  $U_1$  и  $U_2$  в измерительной диагонали моста равны друг другу и выходной сигнал  $U_{\text{вых}} = U_1 - U_2 = 0$ , т.е. мост сбалансирован. В реальности фототранзисторы имеют некоторый разброс параметров, поэтому с помощью подстроечного резистора  $R_n$  или резисторов в цепях истоков  $R_H$  производят первоначальную балансировку моста. Освещение структуры ФПУ потоком  $\Phi$  вызывает рост – уменьшение сопротивления транзисторов ФТ<sub>1</sub> и увеличение сопротивления транзисторов ФТ<sub>2</sub>. Это приводит к разбалансировке моста, потенциал  $U_1$  растет, потенциал  $U_2$  уменьшается, т.е. выходной сигнал  $U_{\text{вых}} = U_1 - U_2$  увеличивается с ростом светового потока  $\Phi$ .

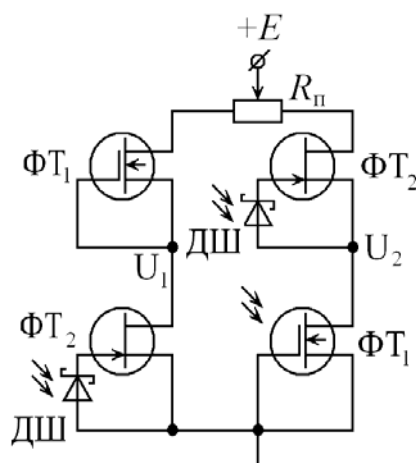


Рисунок 8 – Эквивалентная схема мостового фотодатчика

Экспериментальные образцы ФПУ изготавливались на базе серийного МДП-транзистора КП-305 (транзисторы  $\Phi T_1$ ), указанной на рис.7,а структуры. При напряжении исток-сток  $U_{ис} = 10$  В и замкнутом затворе сопротивление канала составлял  $\sim 10$  кОм. Транзисторы  $\Phi T_2$  отличаются тем, что между слоем металла и диэлектриком расположен слой полупроводника *n*-типа. Толщина этого слоя должна быть такой, чтобы весь свет поглощался в нем и не доходил до канала. Для освещения фототранзисторов был использован «зеленый» светодиод типа АЛ102ДМ (максимум излучения на длине волны  $\lambda = 0,56$  мкм). Максимальная мощность освещения составляла 0,6 мВт при токе через светодиод 100 мА. Установлено, что фоточувствительность экспериментальных образцов ФПУ при  $E = 20$  В была в 10...100 раз выше, чем у фотоприемников на базе фотодиодов и биполярных транзисторов [7].

В заключение отметим, что мостовые схемы применяют также для конструирования датчиков давления. В качестве датчиков давления широко используют кремниевые мембраны, представляющие собой пластину с четырьмя диффузионными тензорезисторами, образующими измерительный мост [2]. Нами установлено, что замена резисторов на полевые транзисторы также позволяет значительно увеличить чувствительность датчиков давления.

Использование в измерительных мостах полевых транзисторов (ПТ) позволяет значительно увеличить чувствительность датчиков, снизить энергопотребление, повысить стабильность измерительных устройств.

### Литература

1. Шарапов В.М. Датчики / Шарапов В.М., Викулин И.М., Курмашев Ш.Д. – Черкассы: Брама, 2008. – 1072 с.
2. Тесленко В.А. Датчики в системах сбора данных и управления / В.А. Тесленко // Промышленные измерения, контроль, автоматика, диагностика (ПиКАД). – 2004. – Д. 2. – С. 50 – 56.
3. Викулин И.М. Гальваномангнитные приборы / Викулин И.М., Викулина Л.Ф., Стафеев В.И. – М.: Радио и связь, 1983. – 104 с.
4. Викулин И.М. Физика полупроводниковых приборов / Викулин И.М., Стафеев В.И. – М.: Радио и связь, 1990. – 264 с.
5. Кривонос А.И. Полупроводниковые датчики температуры / Кривонос А.И. – М.: Энергия, 1974. – 184 с.
6. Зуев В.А. Фотоэлектрические МДП-приборы / В.А. Зуев, В.Г. Попов. – М.: Радио и связь, 1983. – 160 с.
7. Викулин И.М. Инжекционные фотоприемники / И.М. Викулин, Ш.Д. Курмашев, В.И. Стафеев // ФТП. – 2008. – Т. 42. – Вып. 1. – С.113 – 121.