

06

## Датчик магнитного поля на основе компенсированного кремния

© М.К. Бахадырханов, Х.М. Илиев, К.С. Аюпов, О.Э. Сатторов

Ташкентский государственный технический университет им. А.Р. Беруни,  
Узбекистан

E-mail: tstu@uzpak.uz

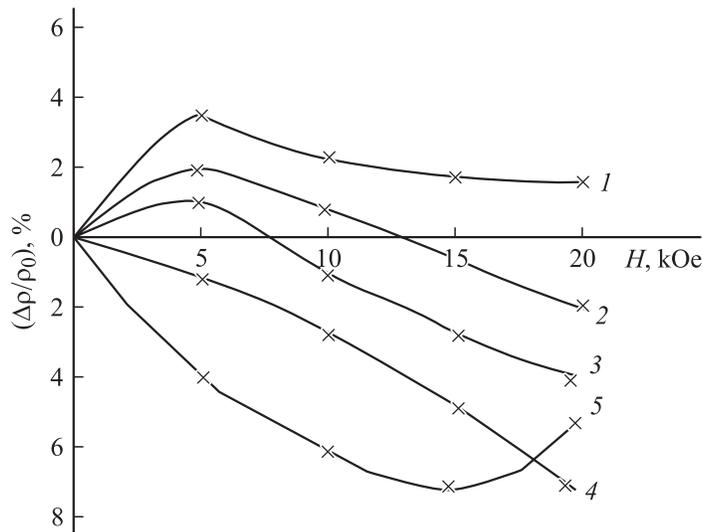
В окончательной редакции 8 апреля 2003 г.

Исследованы эффект отрицательного магнитного сопротивления в кремнии, компенсированная марганцем, и возможность его использования в датчиках магнитного поля.

Как известно, в технике широко применяются датчики магнитного поля. Физический принцип работы существующих полупроводниковых датчиков магнитного поля основан на эффекте Холла, который приводит к эффекту положительного магнитосопротивления, наблюдаемого в полупроводниковых материалах и приборах на их основе [1–6]. При этом основным недостатком таких датчиков является их невысокая чувствительность ( $\Delta\rho/\rho_0 \leq 5\%$ ). Наиболее перспективным путем повышения чувствительности датчиков магнитного поля является использование нового физического явления — эффекта отрицательного магнитосопротивления (ОМС), обнаруженного в компенсированном кремнии, легированном примесями с незаполненными  $d$ -оболочками [7–9].

В данной работе приводятся результаты исследования эффекта ОМС в кремнии, компенсированном марганцем, и возможности его использования при разработке датчиков магнитного поля. Компенсированные образцы  $\text{Si}\langle\text{B}, \text{Mn}\rangle$  были получены диффузионным легированием кремния марганцем из газовой фазы. В качестве исходного материала был использован монокристаллический кремний  $p$ -типа проводимости с удельным сопротивлением  $1 \Omega \cdot \text{cm}$  (марки КДБ-1). При этом температура и время диффузионного отжига выбирались таким образом, чтобы получить компенсированные и перекомпенсированные образцы  $\text{Si}\langle\text{B}, \text{Mn}\rangle$   $p$  и  $n$ -типа проводимости с удельным сопротивлением  $\rho_0$  при комнатной температуре  $10^2 \div 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ . Однородность распределения

электроактивных атомов Mn в объеме Si достигалась диффузией из постоянного источника с достаточно большим временем диффузионного отжига и быстрым охлаждением (скорость охлаждения более  $200^\circ\text{C/s}$ ). Для каждого значения удельного сопротивления исследовалось более 20 образцов, полученных при одинаковых технологических условиях. Разброс величины удельного сопротивления при этом не превышал 25%. Статистическая обработка данных по 20 образцам, полученная для величины относительного изменения сопротивления образцов в магнитном поле показала, что разброс величины  $\Delta\rho/\rho_0$  не превышает 0.5%, т.е. разброс удельного сопротивления образцов слабо влияет на величину  $\Delta\rho/\rho_0$ . Измерение деградационных характеристик велось нами на 10 образцах с различным удельным сопротивлением. Эти образцы хранились в течение 1 месяца при температуре около  $50^\circ\text{C}$ , при этом изменения удельного сопротивления и  $\Delta\rho/\rho_0$  не наблюдалось, это подтверждает стабильность параметров Si(B, Mn) в диапазоне температур до  $50^\circ\text{C}$ . Магнитосопротивление в компенсированных образцах Si(B, Mn) измерялось в поперечном ( $H \perp J$ ) и продольном ( $H \parallel J$ ) магнитном поле, при комнатной температуре, как в темноте, так и при освещении интегральным светом от лампы накаливания. Измерения  $\Delta\rho/\rho_0$  проводились путем измерения тока через образец, при постоянном напряжении на нем; расчетная величина электрического поля  $50\text{ V/cm}$ . Значение напряженности магнитного поля изменялось в пределах  $0 \div 20\text{ kOe}$ , что обеспечивало условие слабого магнитного поля. Изменение направления магнитного поля на  $180^\circ$  не изменяет величину  $\Delta\rho/\rho_0$ . Исследования показали, что, в отличие от перекомпенсированного  $n\text{-Si(B, Mn)}$ , где независимо от удельного сопротивления всегда имеет место положительное магнитосопротивление, в исследуемой области магнитного поля в компенсированном  $p\text{-Si(B, Mn)}$  наблюдается ряд очень интересных явлений. На рис. 1 представлена зависимость относительного изменения удельного сопротивления от поперечного магнитного поля ( $H \perp J$ ) в компенсированных образцах  $p\text{-Si(B, Mn)}$  с различным удельным сопротивлением. Как видно из рисунка, в образцах с  $\rho_0 \leq 3 \cdot 10^2\ \Omega \cdot \text{cm}$  наблюдается небольшое положительное магнитосопротивление (ПМС), сравнимое с магнитосопротивлением исходного кремния во всех исследованных областях магнитного поля (кривая 1). В образцах с удельным сопротивлением  $\rho_0 \geq 5 \cdot 10^2\ \Omega \cdot \text{cm}$  сначала наблюдается положительное магнитосопротивление, затем знак магнитосопротивления меняется и имеет место

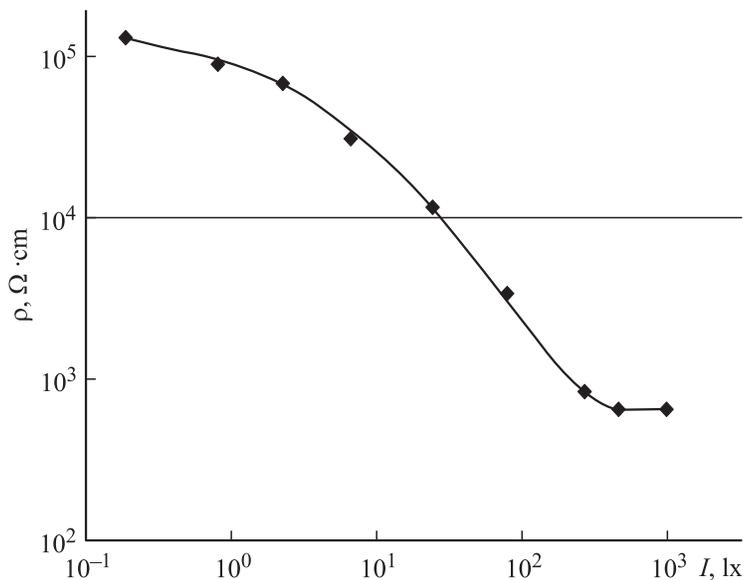


**Рис. 1.** Зависимость магнитосопротивления от удельного сопротивления в темноте при  $T = 300\text{ K}$ ,  $E = 50\text{ V/cm}$ : 1 —  $\rho_0 = 2.5 \cdot 10^2\ \Omega \cdot \text{cm}$ ; 2 —  $\rho_0 = 5 \cdot 10^2\ \Omega \cdot \text{cm}$ ; 3 —  $\rho_0 = 1.5 \cdot 10^3\ \Omega \cdot \text{cm}$ ; 4 —  $\rho_0 = 6 \cdot 10^3\ \Omega \cdot \text{cm}$ ; 5 —  $\rho_0 = 6.5 \cdot 10^4\ \Omega \cdot \text{cm}$ .

отрицательное магнитосопротивление, величина которого растет с ростом напряженности магнитного поля (кривая 2). С ростом удельного сопротивления образцов  $p\text{-Si(B, Mn)}$  значение магнитного поля, при котором наблюдается инверсия магнитосопротивления, смещается в сторону меньших магнитных полей, а для образцов с  $\rho_0 > 5 \cdot 10^3\ \Omega \cdot \text{cm}$  во всей исследованной области магнитных полей наблюдается только отрицательное магнитосопротивление.

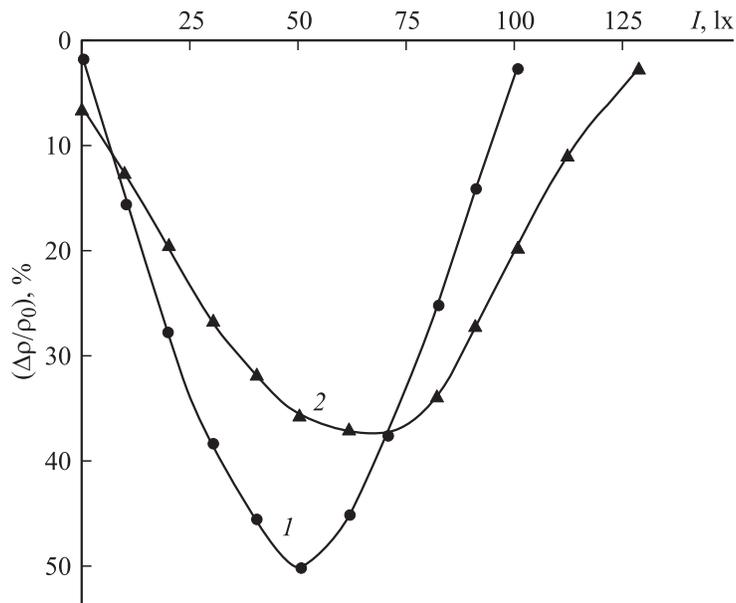
Установлено, что максимальное ОМС наблюдается в образцах  $p\text{-Si(B, Mn)}$  с  $\rho_0 \approx (6 \div 8) \cdot 10^3\ \Omega \cdot \text{cm}$ . Следует отметить, что значение ОМС в этих образцах значительно больше, чем значение положительного магнитосопротивления в перекомпенсированных образцах при таких же условиях.

Как известно из литературных данных [10,11], сильно компенсированные образцы  $p\text{-Si(B, Mn)}$  обладают большой фоточувствитель-



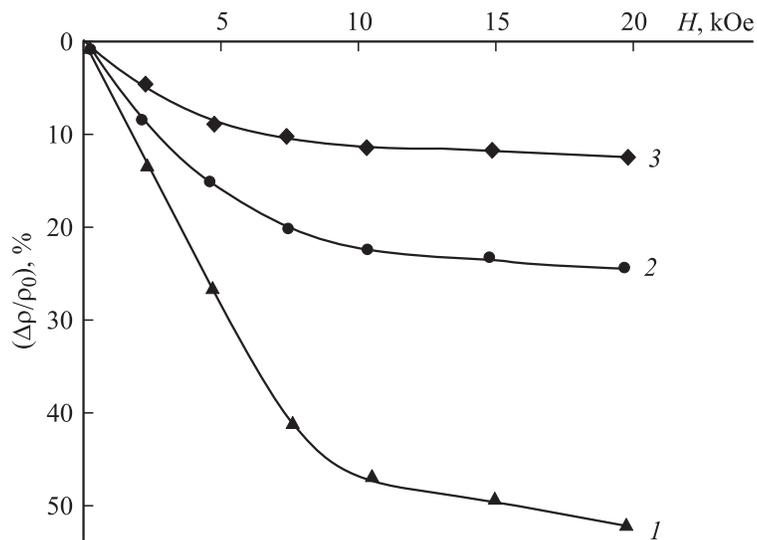
**Рис. 2.** Зависимость удельного сопротивления образцов  $\text{Si}(\text{B}, \text{Mn})$  с  $\rho_0 = 1.3 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$  от интенсивности интегрального света без магнитного поля.  $T = 300 \text{ K}$ ,  $E = 50 \text{ V/cm}$ .

ностью, что позволяет управлять удельным сопротивлением материала в широком диапазоне в зависимости от уровня освещения. На рис. 2 приведена зависимость изменения удельного сопротивления в образцах  $\text{Si}(\text{B}, \text{Mn})$  с  $\rho_0 = 1.3 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$  от интенсивности интегрального света без магнитного поля при  $T = 300 \text{ K}$ ,  $E = 50 \text{ V/cm}$ . Оценки, сделанные по результатам измерения фотоэлектромагнитного эффекта, показали, что ошибка измерения удельного сопротивления в этих образцах за счет фотоэлектромагнитного эффекта в магнитном поле  $H = 20 \text{ kOe}$  и освещенности  $I = 50 \text{ lx}$  составляет не более 0.9%. С уменьшением удельного сопротивления образцов эта ошибка уменьшается. В отличие от обычных низкоомных полупроводниковых материалов, в сильно компенсированном кремнии, легированном марганцем, магнитосопротивление очень чувствительно к освещению образцов. Поэтому для выявления влияния интегрального освещения на магнитосопротив-



**Рис. 3.** Зависимость магнитосопротивления от интенсивности интегрального света в образцах  $\text{Si}(\text{B}, \text{Mn})$ ,  $H = 20 \text{ kOe}$ ,  $E = 50 \text{ V/cm}$ ,  $T = 300 \text{ K}$ . 1 —  $\rho_0 = 1.3 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$  (исх. КДБ-1), 2 —  $\rho_0 = 6.2 \cdot 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$  (исх. КДБ-1),  $\rho_0$  — удельное сопротивление образцов в отсутствие магнитного поля.

ление в сильнокомпенсированном  $\text{Si}(\text{B}, \text{Mn})$  с  $\rho_0 = 1.3 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$  и  $\rho_0 = 1.3 \cdot 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$  исследована зависимость магнитосопротивления образцов от интенсивности интегрального света в магнитном поле  $H = 20 \text{ kOe}$ . На рис. 3 показана зависимость магнитосопротивления образцов  $\text{Si}(\text{B}, \text{Mn})$  с максимальной концентрацией электроактивных атомов Mn при постоянном значении напряженности магнитного поля с использованием лампы накаливания от освещенности. Как видно из рисунка, в образцах  $\text{Si}(\text{B}, \text{Mn})$  с удельным сопротивлением  $\rho_0 = 1.3 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$  зависимость значения магнитосопротивления от интенсивности интегрального освещения состоит из двух четко выраженных участков (кривая 1). Первый участок до  $I = 50 \text{ lx}$ , где магнитосопротивление с ростом интенсивности интегральной освещен-



**Рис. 4.** Зависимость магнитосопротивления от магнитного поля в образцах Si(B, Mn) при различных концентрациях компенсирующих примесей  $I = 50$  lx,  $E = 50$  V/cm,  $T = 300$  K,  $\rho_0$  — удельное сопротивление образцов в отсутствие магнитного поля. 1 —  $\rho_0 = 1.3 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$  (исх. КДБ-1), 2 —  $\rho_0 = 1.3 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$  (исх. КДБ-10), 3 —  $\rho_0 = 1.3 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$  (исх. КДБ-100).

ности растет достаточно быстро, и при  $I = 45 \div 50$  lx достигает своего максимального значения  $(\Delta\rho/\rho_0)_{\text{max}}$ . Дальнейший рост интенсивности интегрального света приводит к уменьшению ОМС. При больших значениях интенсивности интегрального света ( $I > 100$  lx) магнитосопротивление близко к нулю. Результаты исследования показали, что с уменьшением удельного сопротивления образцов значения интенсивности интегрального света, соответствующие  $(\Delta\rho/\rho_0)_{\text{max}}$  смещаются в сторону высоких интенсивностей (кривая 2). Следует отметить, что только при определенной интенсивности освещения интегральным светом значение ОМС достигает своего аномально большого значения (до 50%).

Мы предполагаем, что значение ОМС должно существенно зависеть от концентрации компенсирующих примесных атомов марганца (Mn).

В связи с этим нами были получены сильнокомпенсированные образцы  $p$ -Si(B, Mn) на исходном материале КДБ-1, КДБ-10 и КДБ-100 с одинаковыми удельными сопротивлениями, при этом концентрация электроактивных атомов марганца менялась в пределах  $10^{14} \div 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . На рис. 4 приведена зависимость ОМС в этих образцах. Как видно из рисунка, в одинаковых условиях (освещенности, удельном сопротивлении, температуре и т.д.) в образцах, где концентрация электроактивных примесных атомов марганца равна  $N_{\text{Mn}} = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , магнитосопротивление почти в 5–6 раз больше, чем в образцах, где концентрация электроактивных примесных атомов марганца составляла  $N_{\text{Mn}} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Установлено, что значения магнитосопротивления, где начинается излом линейной зависимости, с ростом концентрации электроактивных примесных атомов марганца смещаются в сторону больших магнитных полей. Такая зависимость может быть связана с увеличением концентрации электроактивных примесных атомов марганца с электронной структурой  $d^5 s^0$ , что и приводит к увеличению концентрации магниточувствительных центров. Очень слабое ПМС в исходных и контрольных образцах без марганца также свидетельствует о большом вкладе атомов марганца в магнитосопротивление кремния.

Приведенные выше данные исследований показывают, что в определенных условиях чувствительность полупроводниковых датчиков на основе кремния, компенсированного марганцем с использованием ОМС, может превысить чувствительность датчиков на основе положительного магнитосопротивления более чем в 10 раз. Таким образом, подбирая интенсивность интегрального освещения, удельное сопротивление образца и концентрацию введенных электроактивных атомов марганца, можно получить максимальное значение ОМС и использовать его при разработке новых типов высокочувствительных датчиков магнитного поля.

## Список литературы

- [1] Стафеев В.И., Каракушан Э.И. Магнитодиоды. М.: Наука, 1975.
- [2] Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. М., 1980. 296 с.
- [3] Гредескул С.А., Фрейлихер В.Д. // Успехи физ. наук. 1990. Т. 160. С. 239.
- [4] Олемской А.И. // Успехи физ. наук. 1996. Т. 166. С. 697.
- [5] Грошев А.Г., Новокионов С.Г. // ФТТ. 2000. Т. 42. В. 7. С. 1322–1330.

- [6] *Абрамович А.И., Мичурин А.В.* // ФТТ. 2000. Т. 42. В. 11. С. 2052–2053.
- [7] *Андреанов Д.Г., Савельев А.С., Фистуль В.И.* и др. // ФТП. 1975. Т. 9. В. 2. С. 210–215.
- [8] *Андреанов Д.Г., Лазарева Г.В., Фистуль В.И.* и др. // ФТП. 1975. Т. 9. В. 8. С. 1555–1560.
- [9] *Омельяновский Э.М., Фистуль В.И.* Примеси переходных металлов в полупроводниках. М., 1983. 192 с.
- [10] *Бахадырханов М.К., Камилев Т.С.* и др. // ФТП. 1975. Т. 9. В. 1. С. 76–80.
- [11] *Бахадырханов М.К., Азизов К.А.* и др. // ФТП. 1980. Т. 14. В. 11. С. 1028–1035.