

## Особенности магнетосопротивления в перекомпенсированном кремнии, легированном марганцем

© М.К. Бахадырханов, Г.Х. Мавлонов<sup>¶</sup>, Х.М. Илиев, К.С. Аюпов, О.Э. Саттаров, С.А. Тачилин

Ташкентский государственный технический университет,  
100095 Ташкент, Узбекистан

(Получена 11 ноября 2013 г. Принята к печати 3 декабря 2013 г.)

Экспериментально установлено, что достаточно большое отрицательное магнетосопротивление в кремнии наблюдается не только в компенсированном  $p$ -Si(B, Mn), а также в перекомпенсированном  $n$ -Si(B, Mn) с положением уровня Ферми  $F = E_C - 0.35 \div E_C - 0.55$  эВ. Величина, а также температурная область существования отрицательного магнетосопротивления в таких материалах определяется положением уровня Ферми.

### 1. Введение

В работах [1,2] нами было показано, что в компенсированных образцах кремния  $p$ -типа с комплексами атомов марганца  $[Mn]_4$  при комнатной температуре наблюдается аномально высокое отрицательное магнетосопротивление (ОМС)  $\frac{\Delta\rho}{\rho} \geq 100\%$ . С понижением температуры ОМС увеличивается и достигает своего максимального значения при  $T = 230-240$  К. Дальнейшее уменьшение температуры приводит к ослаблению ОМС, а при  $T = 170-180$  К, происходит инверсия знака, т.е. ОМС переходит в небольшое положительное магнетосопротивление (ПМС). Также было показано, что в перекомпенсированных образцах кремния  $n$ -типа с марганцем, в которых не были обнаружены спектры ЭПР, связанные с комплексами атомов марганца  $[Mn]_4$ , при комнатной температуре всегда наблюдается небольшое ПМС. Поскольку комплексы атомов марганца обладают достаточно большим магнитным моментом и в компенсированных образцах находятся в многозарядном состоянии [1], аномально большое ОМС при комнатной температуре в  $p$ -кремнии объясняется магнитными моментами и многозарядным состоянием комплексов атомов марганца  $[Mn]_4$  в таких образцах. В перекомпенсированных образцах, в которых атомы марганца в основном находятся в дискретном состоянии ( $Mn^0$ ,  $Mn^+$  и  $Mn^{++}$ ), исследование магнетосопротивления (МС) в области низких температур позволяет определить вклад атомов марганца в магнитные свойства материала, что представляет интерес с точки зрения управления магнитными свойствами кремния, легированного марганцем.

### 2. Методика эксперимента

Образцы были изготовлены на основе монокристаллического кремния  $p$ -типа с  $\rho = 5$  Ом·см (КДБ-5). Легирование марганцем проводилось методом низкотемпературной диффузии [3] при таких условиях, чтобы получить перекомпенсированный материал

$n$ -типа с  $\rho \approx 10^2-10^5$  Ом·см. Если учесть, что атомы марганца в кремнии создают два донорных уровня  $E_1 = E_C - 0.27$  эВ и  $E_2 = E_C - 0.5$  эВ [4], то в полученных образцах уровни Ферми лежат в интервале  $F = E_C - (0.31-0.5)$  эВ, т.е. атомы марганца в таких материалах находятся в основном в состоянии  $Mn^+$  и частично  $Mn^0$ ,  $Mn^{++}$ .

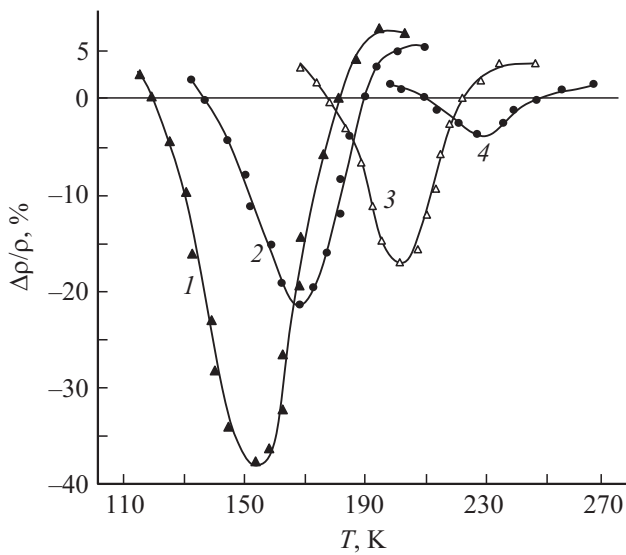
Исследование МС образцов в интервале температур  $T = 100-300$  К при различных электрических полях и при  $B = 1$  Тл проводилось на стандартной установке [5].

### 3. Результаты экспериментов и их обсуждение

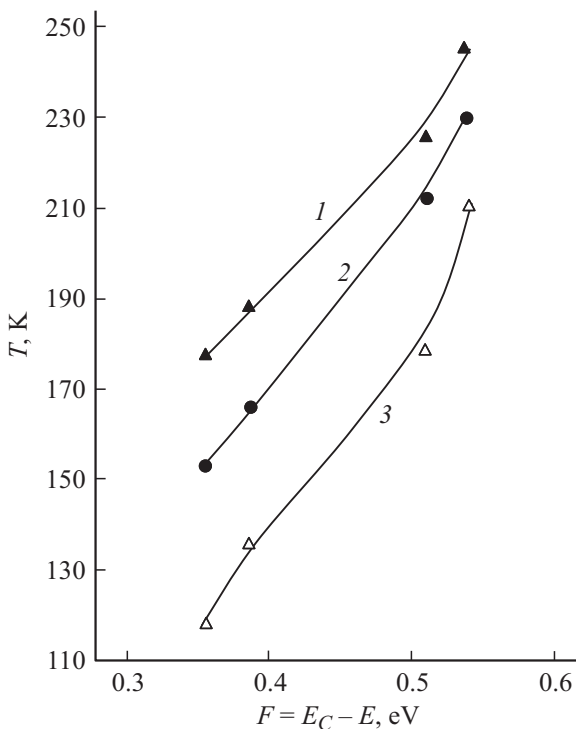
Результаты исследования показали, что при  $T = 300$  К независимо от электрических и магнитных полей в исследуемых образцах всегда имеется небольшое ПМС.

Интересные результаты были получены в перекомпенсированных образцах при понижении температуры  $T < 300$  К. Как видно из рисунка (рис. 1), с понижением температуры значение ПМС медленно уменьшается, а при  $T \approx T_{thr}$  происходит инверсия знака МС, т.е. переход от ПМС к ОМС. При дальнейшем понижении температуры  $T < T_{thr}$ , значение ОМС достаточно быстро увеличивается и достигает своего максимального значения при определенной температуре  $T = T_{max}$ , а при  $T < T_{max}$ , во всех образцах значение ОМС уменьшается и при температурах  $T < T_{min}$  происходит температурное гашение ОМС. При температурах  $T < T_{min}$  МС опять меняет знак и переходит от ОМС к ПМС. Таким образом, наблюдается двойная инверсия МС. Следует отметить, что значение пороговой температуры ( $T_{thr}$ ), при которой происходит инверсия знака МС от ПМС к ОМС, зависит от положения уровня Ферми образцов, и со смещением уровня Ферми к середине запрещенной зоны, она смещается в сторону высоких температур (рис. 2). С ростом положения уровня Ферми этот эффект проявляется еще более существенно. Значения  $T_{max}$ , где наблюдается максимальное ОМС, и  $T_{min}$  — граница исчезновения ОМС, также зависят от положения уровня Ферми. В образцах со смещением к середине запре-

<sup>¶</sup> E-mail: mavlonov\_g@mail.ru



**Рис. 1.** Температурная зависимость МС в кремнии при  $E = 50$  В/см:  $B = 1$  Тл:  $n$ -Si(B, Mn) 1 —  $F = E_C - 0.37$  эВ, 2 —  $F = E_C - 0.384$  эВ, 3 —  $F = E_C - 0.516$  эВ, 4 —  $F = E_C - 0.53$  эВ.



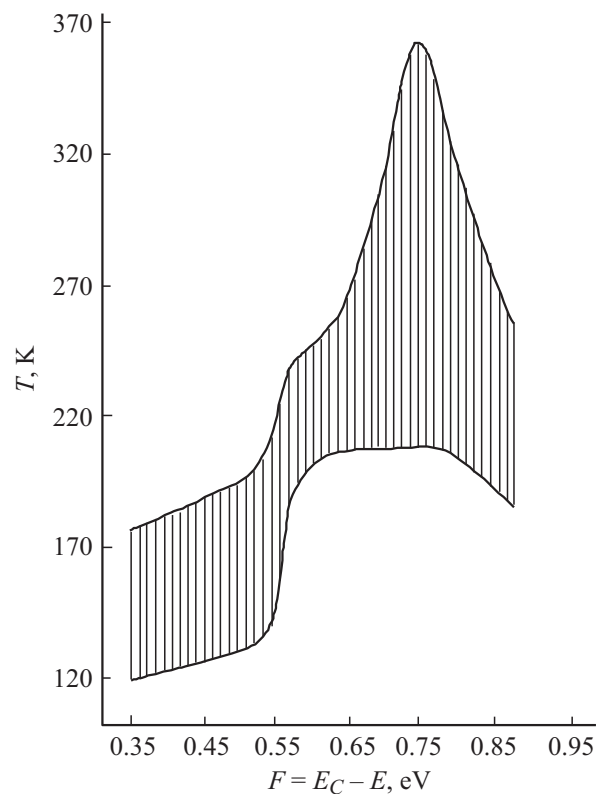
**Рис. 2.** Зависимости  $T_{thr}$  (1),  $T_{max}$  (2) и  $T_{min}$  (3) от положения уровня Ферми в образцах.

щенной зоны они смещаются в сторону более высоких температур (рис. 2).

На основе полученных данных по исследованию МС как в компенсированных, так и в перекомпенсированных образцах, была определена температурная область существования ОМС (рис. 3) в зависимости от положения уровня Ферми.

Как видно из рис. 3, кремний, легированный марганцем, обладает большим ОМС в достаточно широком интервале температур. Управляя положением уровня Ферми в материале, можно изменять значение ОМС в достаточно широком интервале (5–100%). За границей положения уровня Ферми  $F < F = E_V + 0.31$  и  $F < F = E_C - 0.35$  эВ, а также в области температур  $T > 360$  К и  $T < 120$  К наблюдается только ПМС.

Наблюдаемое ОМС в  $p$ -Si(B, Mn) в области комнатной температуры (до  $T = 360$  К) и его аномально высокие значения говорят о том, что природа ОМС в этих материалах объясняется магнитными моментами и многозарядным состоянием комплексов атомов марганца [Mn]<sub>4</sub>, которые состоят из 4 атомов, находящихся в эквивалентных межузельных состояниях вокруг отрицательно заряженного атома бора [1,6,7], который обладает максимальным спином  $S = 10$ . В перекомпенсированных образцах наличие ОМС определяется магнитным моментом атомов марганца  $S = 5/2$  и их зарядовым состоянием. Со смещением уровня Ферми от середины запрещенной зоны к зоне проводимости, во-первых, концентрация атомов марганца увеличивается, во-вторых, атомы марганца постепенно переходят от состояния  $Mn^{++}$  к  $Mn^+$ ,  $Mn^0$  и соответственно концентрация последнего увеличивается. Поэтому можно предполагать, что в перекомпенсированных образцах ОМС также определяется магнитным моментом, а также электрическим полем, созданным заряженными атомами



**Рис. 3.** Температурная область существования ОМС в зависимости от положения уровня Ферми.

марганца. Но при этом основную роль играет концентрация атомов марганца.

#### 4. Заключение

Экспериментально установлено, что достаточно большое ОМС в кремнии наблюдается не только в компенсированном  $p\text{-Si}\langle\text{B, Mn}\rangle$  [1,2], а также в перекомпенсированном  $n\text{-Si}\langle\text{B, Mn}\rangle$  с положением уровня Ферми  $F = E_C - 0.35 - E_C - 0.55$  эВ. Величина, а также температурная область существования ОМС в таких материалах определяются положением уровня Ферми. Необходимо отметить, что в отличие от других полупроводниковых материалов [8–10], в кремнии, легированном марганцем, ОМС в области низких температур, наоборот, существенно уменьшается. Эти результаты, с одной стороны, доказывают, что действительно ОМС в Si является высокотемпературным эффектом, а с другой — показывают эффект двойной инверсии знака магнетосопротивления при изменении температуры.

#### Список литературы

- [1] М.К. Бахадырханов, Г.Х. Мавлонов, К.С. Аюпов, С.Б. Исамов. ФТП, **44** (9), 1181 (2010).
- [2] М.К. Бахадырханов, К.С. Аюпов, Х.М. Илиев, Г.Х. Мавлонов, О.Э. Саттаров. Письма ЖТФ, **36** (16), 11 (2010).
- [3] М.К. Бахадырханов, Г.Х. Мавлонов, С.Б. Исамов, Илиев Х.М., К.С. Аюпов, З.М. Сапарниязова, С.А. Тачили. Неорг. матер., **47** (5), 545 (2011).
- [4] К.П. Абдурахманов, А.А. Лебедев, Й. Крейсль, Ш.Б. Утамурадова. ФТП, **19** (2), 213 (1985).
- [5] М.К. Бахадырханов, Х.М. Илиев, К.С. Аюпов, О.Э. Письма ЖТФ, **29** (17), 8 (2003).
- [6] G.W. Ludwig, H.H. Woodbury, R.O. Carlson. J. Phys. Chem. Sol., **8**, 490 (1959).
- [7] J. Kreissl, W. Gehlhoff. Phys. Status Solidi B, **145**, 609 (1988).
- [8] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, А.Ф. Липаев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **40** (5), 519 (2006).
- [9] А.И. Вейнгер, А.Г. Забродский, Т.В. Тиснек. ФТП, **34** (7), 774 (2000).
- [10] В.Э. Каминский. ФТП, **36** (11), 1360 (2002).

Редактор Т.А. Полянская

#### Magnetoresistance in overcompensated silicon doped with Manganese

*M.K. Bakhadir Khanov, G.H. Mavlonov, X.M. Iliev, K.S. Ayupov, O.E. Sattarov, S.A. Tachilin*

Tashkent State Technical University,  
100095 Tashkent, Uzbekistan

**Abstract** It has been experimentally established that significantly high negative magnetoresistance in Si manifests itself not only in compensated  $p\text{-Si}\langle\text{B, Mn}\rangle$  but also in overcompensated  $n\text{-Si}\langle\text{B, Mn}\rangle$  with Fermi band  $F = E_C - 0.35 - E_C - 0.55$  eV. The value of and the temperature range of the negative magnetoresistance in such materials is determined by location of Fermi band.