

Краткие сообщения

06 Управление магнитными свойствами кремния с нанокластерами атомов марганца

© М.К. Бахадырханов, Г.Х. Мавлонов, Х.М. Илиев

Ташкентский государственный технический университет,
100095 Ташкент, Узбекистан
e-mail: mavlonov_g@mail.ru

(Поступило в Редакцию 5 ноября 2014 г.)

Экспериментально установлено, что магнитными свойствами кремния с нанокластерами атомов марганца можно управлять в достаточно широком интервале магнитного и электрического полей, и температуры в зависимости от положения уровня Ферми.

Введение

Отрицательное магнетосопротивление (ОМС) наблюдалось во многих полупроводниковых материалах, однако оно обнаруживается только при определенных условиях, т.е. при наличии большого электрического и магнитного поля, а также очень низкой температуры $T = 4.2\text{--}100\text{ К}$ и большой концентрации примесных атомов. К тому же эти значения магнетосопротивления достаточно низкие и меняются в интервале $\Delta\rho/\rho \sim 0.5\text{--}15\%$ [1–3]. Наблюдаемое ОМС в этих материалах в основном объясняется слабым спин-орбитальным взаимодействием носителей заряда.

Теоретический анализ

Отличительная особенность магнетосопротивления (МС) образцов кремния с нанокластерами атомов марганца $(\text{Mn})_4$ от существующих магнитных полупроводников — это существование в них высокотемпературного ($T = 300\text{ К}$) аномально большого ОМС ($\Delta\rho/\rho \sim 100\%$) [4]. Нанокластеры состоят из 4 заряженных атомов марганца, которые находятся в ближайших междоузельных положениях вокруг отрицательно заряженного атома бора [5,6]. Методом электронного парамагнитного резонанса, а также атомной силовой микроскопии были исследованы состояние и структура таких нанокластеров в решетке кремния. Высокотемпературное и аномально большое ОМС в кремнии с нанокластерами $(\text{Mn})_4$ невозможно объяснить существующими физическими моделями. В связи с этим представляет определенный научно-практический интерес исследование влияния электрического и магнитного полей на ОМС. Такие исследования не только позволят выяснить его природу, но и позволят управлять его параметрами, а также использовать это уникальное явление в электронике.

Методика

Образцы были изготовлены на основе монокристаллического кремния p -типа с $\rho = 5\ \Omega \cdot \text{см}$ (КДБ-5). Легирование марганцем проводилось методом низкотемпературной диффузии [7] с такими условиями, чтобы получить компенсированный материал p -типа с $\rho \sim 10^2 \div 10^5\ \Omega \cdot \text{см}$. Если учесть, что атомы мар-

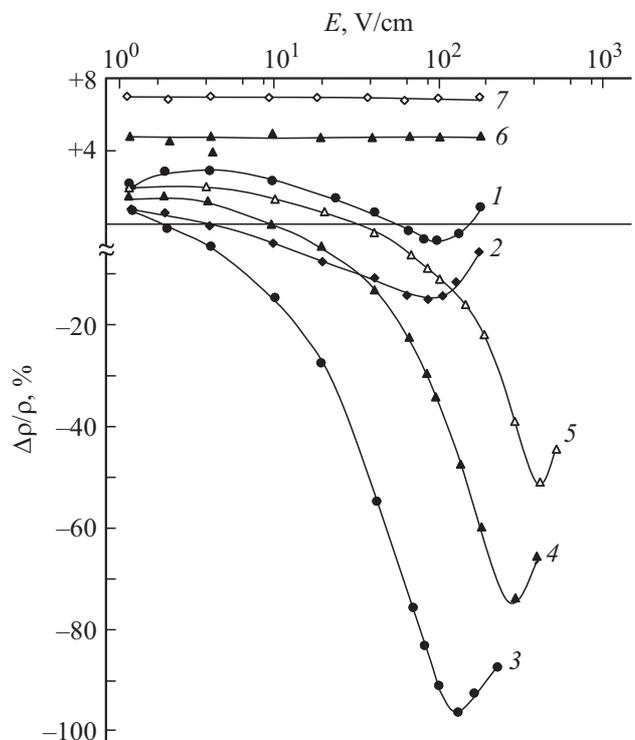


Рис. 1. Зависимость магнетосопротивления от электрического поля в образцах с различными положениями уровня Ферми при $B = 2\text{ Т}$, $T = 300\text{ К}$. Образцы p -типа: 1 — $F = E_V + 0.248$, 2 — $F = E_V + 0.274$, 3 — $F = E_V + 0.385$, 4 — $F = E_V + 0.434$, 5 — $F = E_V + 0.48\text{ эВ}$. Образцы n -типа: 6 — $F = E_C - 0.45$, 7 — $F = E_C - 0.384\text{ эВ}$.

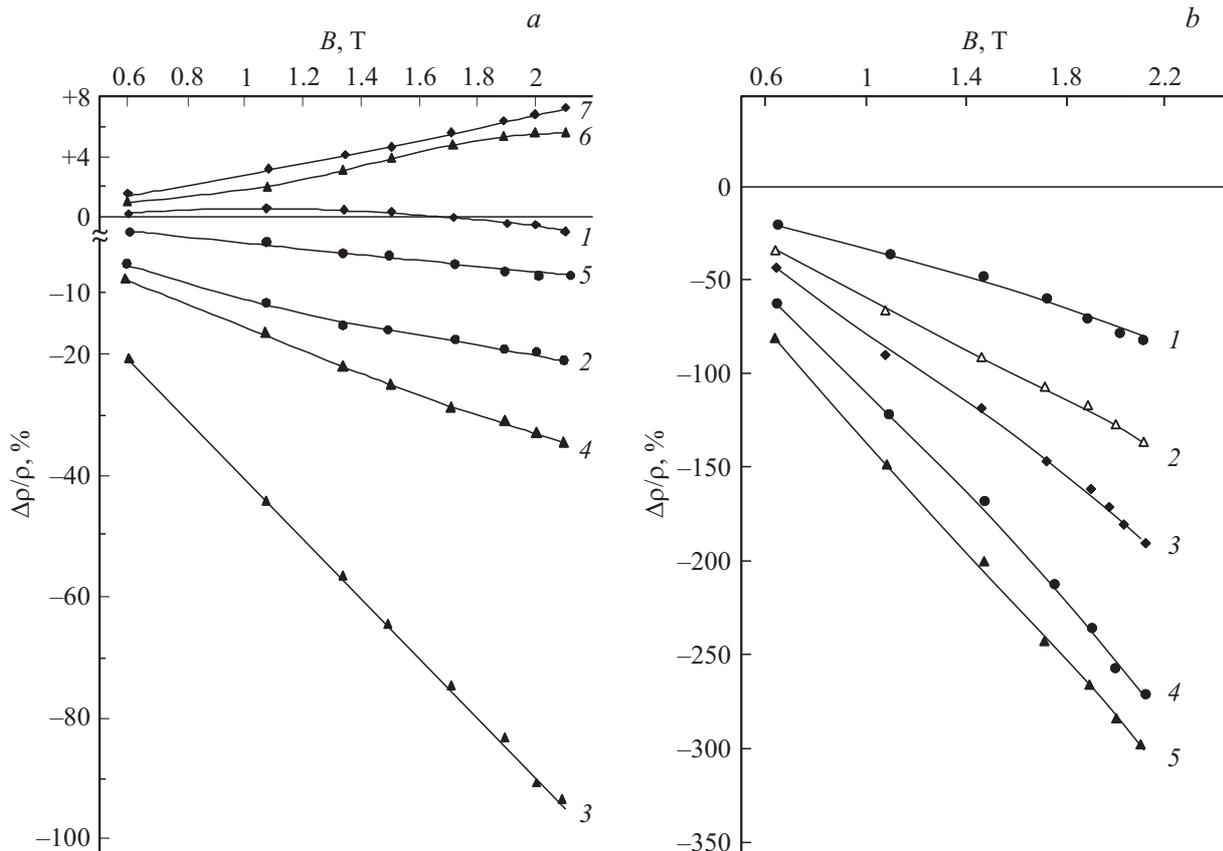


Рис. 2. *a* — зависимость МС от магнитного поля в образцах p -Si(B, Mn) и n -Si(B, Mn) в темноте при различных положениях уровня Ферми, $E = 100$ V/cm, $T = 300$ К. Образцы p -типа: 1 — $F = E_V + 0.248$ eV, 2 — $F = E_V + 0.274$, 3 — $F = E_V + 0.385$, 4 — $F = E_V + 0.434$, 5 — $F = E_V + 0.48$ eV. Образцы n -типа: 6 — $F = E_C - 0.45$, 7 — $F = E_C - 0.384$ eV. *b* — зависимость ОМС от магнитного поля в образцах p -Si(B, Mn) с положением уровня Ферми $F = E_V + 0.385$ eV, $E = 100$ V/cm при различных температурах T , К: 1 — 300, 2 — 283, 3 — 270, 4 — 262, 5 — 235.

ганца в кремнии создают два донорных уровня $E_1 = E_C - 0.27$ eV и $E_2 = E_C - 0.5$ eV [8], то в полученных образцах уровни Ферми лежат в интервале $F = E_V + (0.25-0.48)$ eV, т.е. атомы марганца в таких материалах находятся в основном в состоянии Mn^{++} .

Экспериментальная часть

Исследование магнетосопротивления проводилось на усовершенствованной установке [8], на которой можно изменять магнитное поле в интервале $B = 0.6-2.1$ Т, электрическое поле в интервале $E = 0.01-1000$ V/cm, температуру в интервале $T = 77-350$ К.

На рис. 1 (кривые 6, 7) представлено влияние электрического поля на МС при $T = 300$ К, в образцах n -типа независимо от положения уровня Ферми и напряженности электрического поля наблюдается незначительное положительное магнетосопротивление (ПМС). А в образцах p -типа при низких значениях напряженности электрического поля, независимо от положения уровня Ферми во всех образцах наблюдается небольшое ПМС (кривые 1-5). С ростом напряженности электрического поля значение ПМС уменьшается, происходит инверсия

знака МС, т.е. от ПМС к ОМС при $E > F_{th}$. При дальнейшем увеличении электрического поля (E) значение ОМС быстро увеличивается и достигает своего максимального значения при определенном электрическом поле E_{max} , затем значение ОМС медленно уменьшается, т.е. происходит полевое гашение ОМС. Со смещением уровня Ферми от $F = E_V + 0.385$ eV к середине запрещенной зоны значение электрического поля, при котором наблюдается максимальное ОМС смещается в сторону больших значений электрического поля (E) (кривые 3, 4, 5), в то время как со смещением уровня Ферми от $E = E_V + 0.38$ eV в сторону валентной зоны не только имеет место существенное уменьшение ОМС, но значение (E_{max}) также растет (кривые 3, 2, 1).

Исследование влияния магнитного поля на ОМС показало, что в компенсированных образцах p -Si(B, Mn) с положением уровня Ферми от $F = E_V + 0.248$ ÷ $E_V + 0.48$ eV всегда наблюдается ОМС, значение которого существенно зависит от положения уровня Ферми материала, величина ОМС с ростом магнитного поля увеличивается линейно, и в исследуемой области температур насыщение не наблюдается (рис. 2, *a, b*). Как видно, с уменьшением

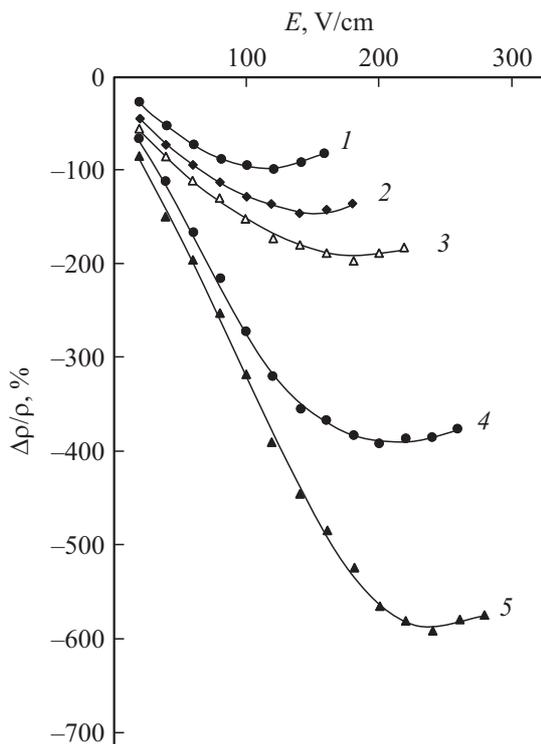


Рис. 3. Зависимость магнетосопротивления от электрического поля в образцах $p\text{-Si}(\text{B}, \text{Mn})$ с положением уровня Ферми $F = E_V + 0.385 \text{ eV}$, $B = 2 \text{ T}$ при различных температурах T , К: 1 — 300, 2 — 283, 3 — 270, 4 — 262, 5 — 235.

температуры значение ОМС увеличивается, но при этом сохраняется его линейная зависимость от роста магнитного поля.

Нами также были исследованы ОМС в образцах с положением уровня Ферми $F = E_V + 0.385 \text{ eV}$ от электрического поля при различных температурах (рис. 3). Результаты показывают, что с ростом электрического поля при всех температурах значение ОМС линейно увеличивается, при дальнейшем увеличении электрического поля линейное увеличение значений ОМС ослабляется и достигает своего максимального значения при (E_m), затем медленно уменьшается. Как видно из рисунка, при понижении температуры область линейного увеличения значений ОМС расширяется и (E_{max}) наблюдаемые максимальные значения ОМС смещаются в сторону больших значений электрического поля, и при температуре $T = 235 \text{ K}$, $E_m = 240 \text{ V}$, имеется максимальное значение ОМС ($\Delta\rho/\rho \sim 600\%$). При дальнейшем понижении температуры $T < 235 \text{ K}$ значения ОМС уменьшаются, но при этом сохраняется внешний вид зависимости с ростом электрического поля.

Результаты и их обсуждения

Установлено, что максимальное ОМС существенно зависит от электрического поля и имеет место в образцах с уровнями Ферми $F = E_V + 0.35 - E_V + 0.38 \text{ eV}$,

т.е. в образцах, где нанокластеры имеют не только многозарядное состояние, но и имеют минимальную концентрацию свободных дырок при $T = 300 \text{ K}$.

Таким образом, кремний с нанокластерами атомов марганца является уникальным материалом, магнитными свойствами которого можно управлять в достаточно широком интервале в зависимости от положения уровня Ферми, магнитного и электрического полей.

Заключение

В отличие от ОМС, обнаруженных в других полупроводниковых материалах, ОМС в кремнии с нанокластерами атомов марганца имеет не только аномально большое значение при $T = 300 \text{ K}$, но также имеет следующие существенные отличия, это линейная зависимость от магнитного поля, т.е. насыщения не наблюдается. Максимальное значение ОМС при $T = 230 - 240 \text{ K}$ при дальнейшем увеличении температуры ОМС уменьшается. Все перечисленные особенности в основном определяются положением уровня Ферми в таких материалах. Таким образом, можно утверждать, что кремний с нанокластерами атомов марганца представляет собой новый класс магнитных полупроводников, в которых можно наблюдать как ПМС, так и ОМС и управлять их значениями в достаточно широком интервале.

Список литературы

- [1] Воронина Т.И., Лагунова Т.С., Михайлова М.П., Моисеев К.Д., Липаев А.Ф., Яковлев Ю.П. // ФТП. 2006. Т. 40. Вып. 5. С. 519–535.
- [2] Вейнгер А.И., Забродский А.Г., Тиснек Т.В. // ФТП. 2000. Т. 34. Вып. 7. С. 774–782.
- [3] Каминский В.Э. // ФТП. 2002. Т. 36. Вып. 11. С. 1360–1366.
- [4] Бахадырханов М.К., Мавлонов Г.Х., Аюпов К.С., Исамов С.Б. // ФТП. 2010. Т. 44. Вып. 9. С. 1181–1184.
- [5] Ludwig G.W., Woodbury H.H., Carlson R.O. // J. Phys. Chem. Sol. 1959. Vol. 8. P. 490.
- [6] Kreissl J., Gehlhoff W. // Phys. Stat. Sol. (b) 1988. Vol. 145. P. 609–616.
- [7] Бахадырханов М.К., Мавлонов Г.Х., Исамов С.Б., Илизев Х.М., Аюпов К.С., Сапариязова З.М., Тачили С.А. // Неорганические материалы. 2011. Т. 47. Вып. 5. С. 545–550.
- [8] Абдурахманов К.П., Лебедев А.А., Крейслер Й., Утамурадова Ш.Б. // ФТП. 1985. Т. 19. Вып. 2. С. 213–216.