

05;06

Влияние электрического поля, освещенности и температуры на отрицательное магнетосопротивление кремния, легированного по методу „низкотемпературной диффузии“

© М.К. Бахадырханов, К.С. Аюпов, Х.М. Илиев,
Г.Х. Мавлонов, О.Э. Саттаров

Ташкентский государственный технический университет, Узбекистан
E-mail: mavlonov_g@mail.ru

В окончательной редакции 22 марта 2010 г.

Экспериментально показано, что в компенсированном кремнии, легированном марганцем с помощью „низкотемпературной диффузии“, наблюдается высокотемпературное, аномально большое ОМС. Установлено, что в таком материале можно менять величину ОМС, изменяя температуру, освещение, электрическое и магнитное поля.

В работах [1,2] нами было показано, что в компенсированном кремнии, легированном марганцем с помощью высокотемпературной диффузии, наблюдается отрицательное магнетосопротивление (ОМС) при комнатной температуре, значение которого достигает величины $\Delta\rho/\rho \sim 6-7\%$. Также нами было показано, что в таком материале значение ОМС увеличивается в $2 \div 5$ раз при его освещении интегральным светом. В данной работе приводятся новые оригинальные результаты по исследованию магнетосопротивления (МС) в кремнии, легированного по новой технологии. Суть данной технологии заключается в начале диффузии при комнатной температуре с дальнейшим поэтапным повышением температуры и выдержкой 5–10 min при конечной температуре. Температура и время выдержки на каждом этапе, а также значение конечной температуры определяются параметрами исходного материала и требованиями к параметрам образца после диффузии. Такая технология не только полностью исключает эрозию поверхности кристалла при диффузии и образование различных интерметаллических

Si–Mn слоев в приповерхностной области, но и позволяет получить однородно легированные образцы с воспроизводимыми электрическими параметрами.

В качестве исходного материала был использован монокристаллический кремний p -типа с $\rho = 5 \Omega \cdot \text{cm}$ (КДБ-5). Управляя условиями легирования, были получены компенсированный p -Si(B, Mn) и перекомпенсированный n -Si(B, Mn) кремний с удельным сопротивлением от 10^2 до $2 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ при $T = 300 \text{ K}$.

Магнетосопротивление образцов исследовалось по стандартной методике на установке, описанной в работе [1], позволяющей изменять температуру от 100 до 350 K, магнитное поле до 2 Т, электрическое поле до 200 V/cm, а также управлять интенсивностью света. Исследование МС-образцов с различными удельными сопротивлениями проводилось в идентичных условиях.

На рис. 1 представлена зависимость МС, компенсированных p -Si(B, Mn) и перекомпенсированных n -Si(B, Mn) образцов с различными удельными сопротивлениями при комнатной температуре. Как видно из рисунка, характер и значение МС-образцов, полученных по новой технологии, существенно отличаются от результата работ [1,2]. Установлено, что в компенсированных образцах p -Si(B, Mn) с удельным сопротивлением от $3 \cdot 10^2$ до $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ всегда наблюдается ОМС, значение которого существенно зависит от удельного сопротивления материала. В образцах с $\rho \sim (6 \div 7) \cdot 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ значение ОМС имеет аномально высокое значение, которое достигает величины более $\Delta\rho/\rho \sim 100\%$. С изменением удельного сопротивления образцов в сторону меньших или больших значений относительно $\rho \sim (6 \div 7) \cdot 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ величина ОМС уменьшается, а в образцах с ρ от $3 \cdot 10^2$ до $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ наблюдается только небольшое положительное МС (ПМС) (кривая 1). В перекомпенсированных образцах n -Si(B, Mn) независимо от их удельного сопротивления всегда наблюдается только небольшое ПМС, значение которого увеличивается с ростом удельного сопротивления образцов.

Нами также исследовалось ОМС в образцах p -Si(B, Mn) с $\rho \sim (6 \div 7) \cdot 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$, полученных по высокотемпературной технологии (кривая 10). Как видно из рис. 2, несмотря на одинаковое удельное сопротивление, размер образцов и идентичные условия исследований, значение ОМС в исследуемой области магнитного поля в образцах, полученных по новой технологии, отличаются в 15–16 раз.

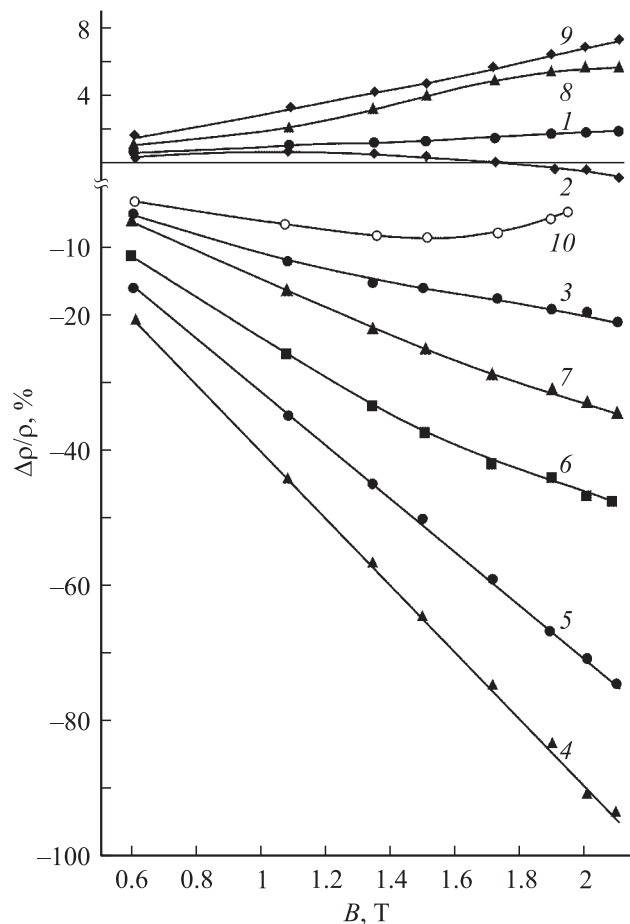


Рис. 1. Зависимость МС от магнитного поля в образцах $p\text{-Si(B, Mn)}$ и $n\text{-Si(B, Mn)}$ в темноте при различных удельных сопротивлениях, $E = 100 \text{ V/cm}$, $T = 300 \text{ K}$. 1 — $\rho = 2 \cdot 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ p -тип, 2 — $\rho = 3 \cdot 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ p -тип, 3 — $\rho = 8 \cdot 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ p -тип, 4 — $\rho = 7 \cdot 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ p -тип, 5 — $\rho = 1.2 \cdot 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ p -тип, 6 — $\rho = 2 \cdot 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ p -тип, 7 — $\rho = 4 \cdot 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ p -тип, 8 — $\rho = 8 \cdot 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ n -тип, 9 — $\rho = 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ n -тип, 10 — $p\text{-Si(B, Mn)}$ с $\rho = 7 \cdot 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$, полученный с помощью высокотемпературной диффузии.

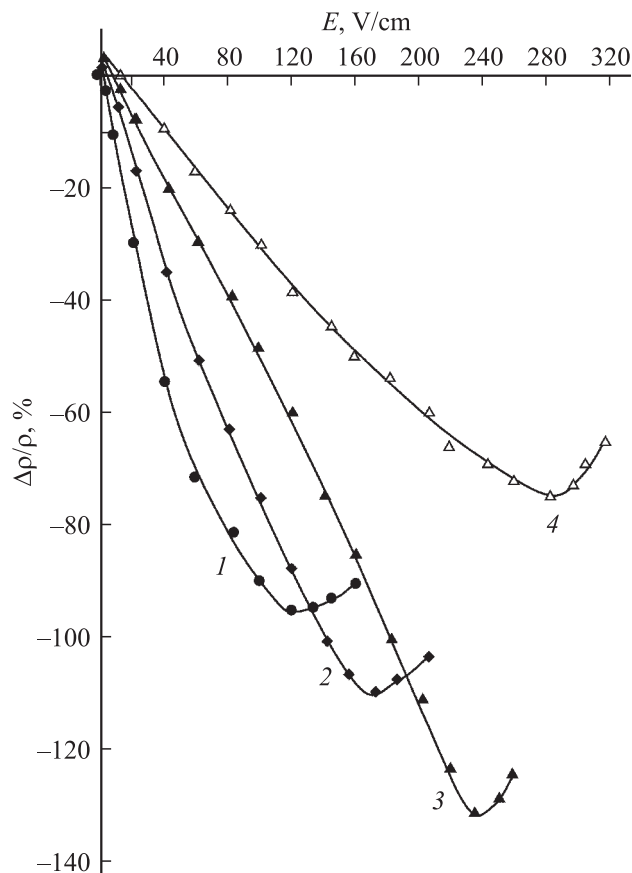


Рис. 2. Зависимость ОМС от электрического поля в образцах $p\text{-Si(B, Mn)}$ в темноте при $B = 2\text{ Т}$, $T = 300\text{ К}$. 1 — $\rho = 7 \cdot 10^3 \Omega \cdot \text{см}$, 2 — $\rho = 1.2 \cdot 10^4 \Omega \cdot \text{см}$, 3 — $\rho = 2 \cdot 10^4 \Omega \cdot \text{см}$, 4 — $\rho = 4 \cdot 10^4 \Omega \cdot \text{см}$.

Таким образом, установлено, что в образцах $p\text{-Si(B, Mn)}$, полученных с помощью „низкотемпературной диффузии“, наблюдается высокотемпературное anomalно высокое ОМС. Как нам известно из литературных данных, во всех существующих монокристаллических полупроводниковых материалах такие anomalно высокие значения ОМС при комнатной температуре вообще никем не наблюдались [3–5].

Интересные результаты были получены при исследовании влияния электрического поля на ОМС в таком материале (рис. 2). Как следует из экспериментальных результатов в области низких электрических полей, во всех образцах имеет место небольшое ПМС, значение которого быстро уменьшается с ростом электрического поля. При некотором значении поля $E = E_0$ происходит инверсия знака МС, т.е. переход от ПМС к ОМС. Значение E_0 колеблется от 1.5 до 10 В/см в зависимости от удельного сопротивления образцов. С дальнейшим увеличением электрического поля значение ОМС растет и достигает своего максимального значения при $E = E_{\max}$, далее при $E > E_{\max}$ наблюдается уменьшение ОМС. Значение E_{\max} , а также максимальное ОМС при E_{\max} , также зависит от удельного сопротивления образцов. Таким образом, можно сказать, что электрическое поле стимулирует ОМС в таком материале.

Исследование влияния интегрального освещения на поведение ОМС в $p\text{-Si}(\text{В}, \text{Mn})$ показало, что в отличие от результатов работ [2] в нашем случае освещение не увеличивает, а, наоборот, приводит к существенному уменьшению ОМС. При более сильном освещении ОМС переходит в ПМС, т.е. происходит инверсия знака МС (рис. 3). Такой характер изменения ОМС от интенсивности освещения имеет место во всех образцах, в которых наблюдается ОМС, независимо от их удельного сопротивления. Эти результаты показывают, что с изменением интенсивности света в узком интервале интенсивностей ($I = 5\text{--}100 \text{ lx}$ (люкс)) можно управлять величиной ОМС.

Также были проведены исследования изменения ОМС в зависимости от температуры в интервале от 100 до 350 К при одинаковых значениях магнитного и электрического поля без освещения. Результаты исследований показали, что в зависимости от удельного сопротивления образцов при $T = 320\text{--}350 \text{ К}$ ОМС в образцах $p\text{-Si}(\text{В}, \text{Mn})$ переходит в ПМС. В тех образцах, где наблюдается максимальное ОМС, соответственно значение T_M смещается в сторону более высоких температур. С понижением температуры $T < T_M$ значение ОМС растет и достигает своего максимального значения при $T = T_k$. Дальнейшее понижение температуры приводит к быстрому уменьшению ОМС и при $T = T_m$, происходит инверсия знака МС, появляется небольшое ПМС, значение T_m которого очень слабо зависит от температуры (рис. 4). В образцах, где наблюдается максимальное ОМС, температурная область его существования достаточно широкая, от 175 до 355 К. Такая зависимость $(\Delta\rho/\rho)_{\text{ОМС}}$ имеет

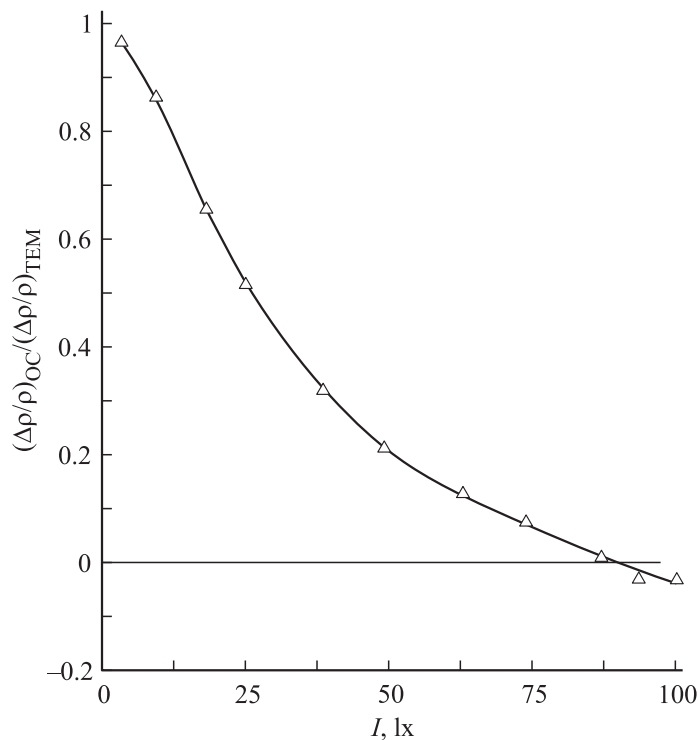


Рис. 3. Относительное изменение ОМС в зависимости от интенсивности освещения в образцах p -Si(B, Mn), $B = 2$ Т, $E = 100$ В/см, $T = 300$ К.

место во всех образцах, в которых наблюдается ОМС, но с ростом удельного сопротивления температурная область существования ОМС сужается.

Таким образом, однозначно установлено, что в компенсированном кремнии, легированном марганцем с помощью „низкотемпературной диффузии“, наблюдается высокотемпературное anomalously большое ОМС. Кремний, компенсированный марганцем по новой технологии, обладает уникальными магнитными и фотоэлектрическими свойствами, которые позволяют создать принципиально новые магнитные и фотоэлектрические приборы. Воздействием электрического поля, осве-

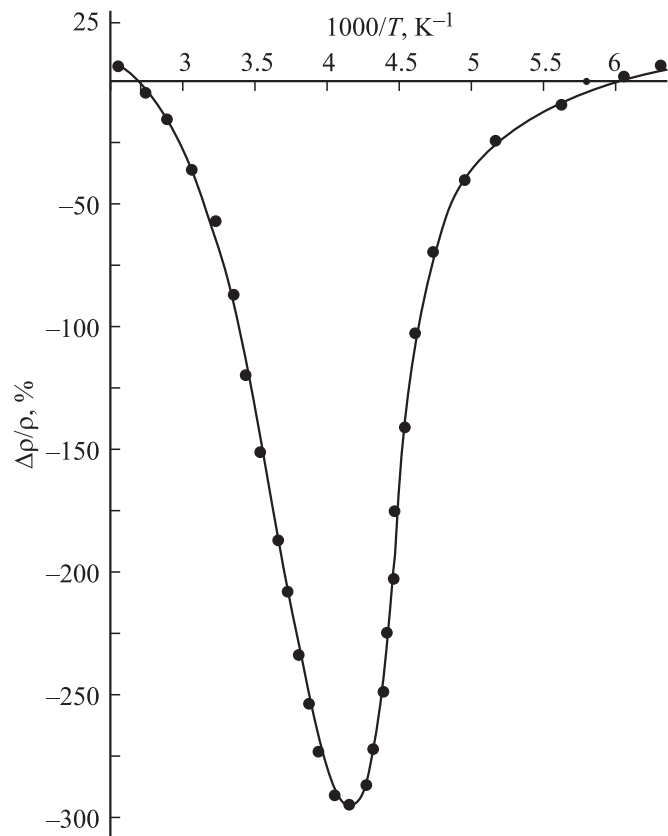


Рис. 4. Температурная зависимость ОМС в образцах $p\text{-Si}(\text{B}, \text{Mn})$ в темноте при $E = 100 \text{ V/cm}$, $B = 2 \text{ T}$.

ценности, температуры можно управлять величиной ОМС, также наблюдается двойная инверсия знака МС.

Природа обнаруженных явлений связана с образованием нанокластеров атомов марганца [6–8] в решетке кремния, которые формируются при медленном охлаждении образцов после высокотемпературной диффузии. Поэтому мы предполагаем, что наблюдаемое нами высокотемпературное и аномально большое ОМС связано с магнитным

моментом нанокластеров $[\text{Mn}]_4$. Так как в компенсированных образцах $p\text{-Si}(\text{B}, \text{Mn})$, в которых наблюдается ОМС, атомы марганца находятся в состоянии $\text{Mn}^{++}(3d^5 4s^0)$. Это предположение требует более подробного исследования состояния атомов марганца в таких образцах методом ЭПР.

Список литературы

- [1] Бахадырханов М.К., Илиев Х.М., Аюпов К.С., Сатторов О.Э. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 17. С. 8–16.
- [2] Бахадырханов М.К., Сатторов О.Э., Илиев Х.М., Аюпов К.С., Туэрди Уймер // ФТП. 2005. Т. 39. В. 7. С. 823–825.
- [3] Лагунова Т.С., Воронина Т.И., Михайлова М.П., Моисеев К.Д., Самохин Е., Яковлев Ю.П. // ФТП. 2003. Т. 37. С. 901–907.
- [4] Каминский В.Э. // ФТП. 2002. Т. 36. В. 11. С. 1360–1366.
- [5] Демидов Е.С., Подольский В.В., Лесников В.П., Левчук С.А., Гусев С.Н., Карзанов В.В. Получение осаждением из лазерной плазмы наноразмерных слоев разбавленных магнитных полупроводников и сплавов Гейслера на основе кремния // Конференция „Кремний-2009“. Новосибирск, 2009.
- [6] Yewondwossen M.H., Ritcey S.P., Yang Z.J. // J. Appl. Phys. 1994. V. 76. N 10.
- [7] Kreissl J., Gehlhoff W. // Phys. Stat. Sol. 1988. B. V. 145. С. 609.
- [8] Ludwig G.W., Woodbury H.H., Carlson R.O. // J. Phys. Chem. Sol. 1959. V. 8. P. 490.