

## Отрицательное магнитосопротивление в кремнии, легированном бором и марганцем, стимулированное электрическим полем и светом

© М.К. Бахадырханов<sup>¶</sup>, О.Э. Саттаров, Х.М. Илиев, К.С. Аюпов, Туэрди Умайер

Ташкентский государственный технический университет им. Абу Райхана Бери, 700095 Ташкент, Узбекистан

(Получена 15 ноября 2004 г. Принята к печати 9 декабря 2004 г.)

Экспериментально установлен эффект стимулирования светом отрицательного магнитосопротивления, наблюдаемого в сильном электрическом поле, в кремнии, легированном бором и марганцем. Определены оптимальные условия — электрическое поле, температура, освещение, а также удельное сопротивление материала — для наблюдения максимального отрицательного магнитосопротивления с таким материалом. Установлена зависимость отрицательного магнитосопротивления от концентрации компенсирующей примеси.

Эффект отрицательного магнитосопротивления (ОМС) в полупроводниковых материалах при сильных электрических полях был исследован в работе [1] и рассмотрен в книге [2]. ОМС в сильном электрическом поле в основном наблюдается при 77 К и достигает своего максимального значения ( $\sim 28\%$ ) при напряженности электрического поля около 500 В/см. В отличие от этих результатов, нами было обнаружено ОМС в *p*-Si, легированном бором и марганцем при комнатной температуре и при относительно низких электрических полях. В связи с этим цель данной работы заключается в определении оптимальных условий существования ОМС.

Компенсированный кремний, легированный марганцем, был получен с помощью диффузии марганца в кремний из газовой фазы по разработанной нами технологии [3]. В качестве исходного материала был использован монокристаллический *p*-Si с удельным сопротивлением  $\rho_{st} = 1-10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  и соответственно с концентрацией бора  $N_B \approx 2 \cdot 10^{15} - 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Концентрация кислорода в этих материалах была практически одинаковой и составляла  $N_O \approx (5-7) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

Температура и время диффузии выбирались с таким расчетом, чтобы получить однородно легированный марганцем компенсированный (*p*-Si(B,Mn)) и перекомпенсированный (*n*-Si(B,Mn)) материалы с удельным сопротивлением  $\rho \approx 10^2 - 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  при комнатной температуре. Во всех экспериментах размеры образцов были одинаковы и составляли  $0.4 \times 0.2 \times 0.05 \text{ см}$ , контакты наносились на торцевые поверхности образцов (грань  $0.2 \times 0.05 \text{ см}^2$ ).

Для создания омических контактов в образцах *p*-Si(B,Mn) использовалось химическое осаждение никеля. Для улучшения адгезии никеля образцы перед никелированием шлифовались микропорошком М-9 и обрабатывались в растворе плавиковой кислоты (HF:H<sub>2</sub>O в соотношении 1:3) для снятия оксида. Электролит для никелирования приготавливался согласно работе [4]. При этом электролит нагревался до 86–90°C, затем

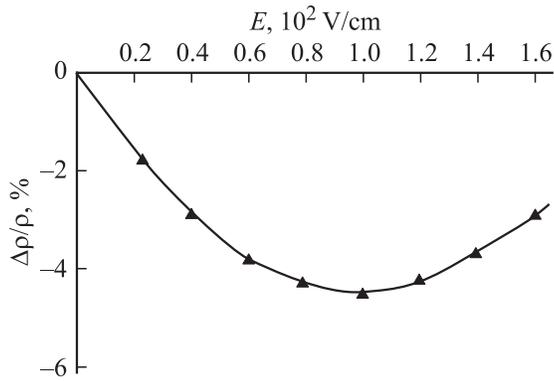
в раствор добавлялся аммиак, гипофосфит натрия, и опускались образцы. Время никелирования составляло  $40 \pm 20 \text{ с}$ . После никелирования поверхность никеля была светло-желтого цвета и однородно покрыта никелем. Омичность никелевого покрытия проверялась по вольт-амперным характеристикам образцов. Качественными считались те образцы, у которых ВАХ была линейна в исследуемой области электрического поля. После никелирования образцы лудились для последующей пайки выводов с использованием канифольевого флюса. Для лужения использовались припой с относительно малой температурой плавления  $T_m$ : ПОСК 50 ( $T_m \approx 150^\circ\text{C}$ ) и ПОСК 61 ( $T_m \approx 180^\circ\text{C}$ ).

При измерении магнитосопротивления  $\Delta\rho/\rho$  значение напряженности магнитного поля  $H$  изменялось в пределах 0–2 Тл. Направление поля было перпендикулярно направлению тока и плоскости  $\langle 111 \rangle$  (грань образцов  $0.4 \times 0.05 \text{ см}^2$ ). Изменение направления напряженности магнитного поля на  $180^\circ$  не изменяет величину  $\Delta\rho/\rho$ , а изменение знака электрического поля изменяет величину  $\Delta\rho/\rho$  примерно на 4–5%. Эти значения усреднялись при вычислении магнитосопротивления.

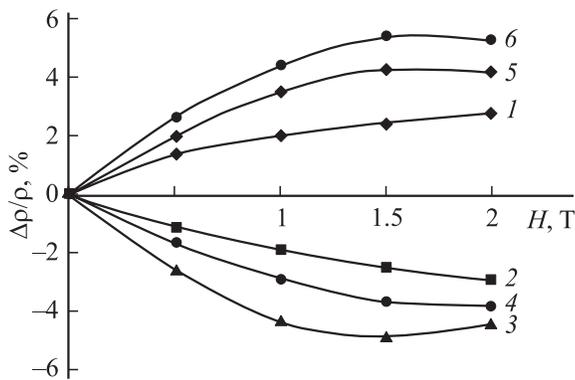
Как показали результаты эксперимента, значение и характер изменения ОМС существенно зависят от приложенного к образцу электрического поля. Поэтому нами исследована зависимость ОМС от электрического поля в образцах *p*-Si(B,Mn) с  $\rho \approx 6.2 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  при комнатной температуре и  $H = 1.5 \text{ Тл}$  (рис. 1). Как видно из рис. 1, значение ОМС с ростом электрического поля растет и достигает своего максимального значения при  $E_{\max} = 90-100 \text{ В/см}$ , а при дальнейшем увеличении  $E$  значение ОМС уменьшается и при  $E \gtrsim 200 \text{ В/см}$  практически стремится к нулю. Область существования ОМС в этих образцах имеет место при  $E < 200 \text{ В/см}$ .

В перекомпенсированных образцах *n*-Si(B,Mn) независимо от их удельного сопротивления всегда имеет место небольшое положительное магнитосопротивление (ПМС), значение которого увеличивается с ростом удельного сопротивления образцов. Следует отметить, что, хотя характер изменения ПМС в этих материалах

<sup>¶</sup> E-mail: tstu@uzpak.uz



**Рис. 1.** Зависимость магнитосопротивления от электрического поля в образце  $p\text{-Si(B,Mn)}$  с удельным сопротивлением  $\rho = 6.2 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  в темноте, при комнатной температуре и постоянном магнитном поле  $H = 1.5 \text{ Тл}$ .



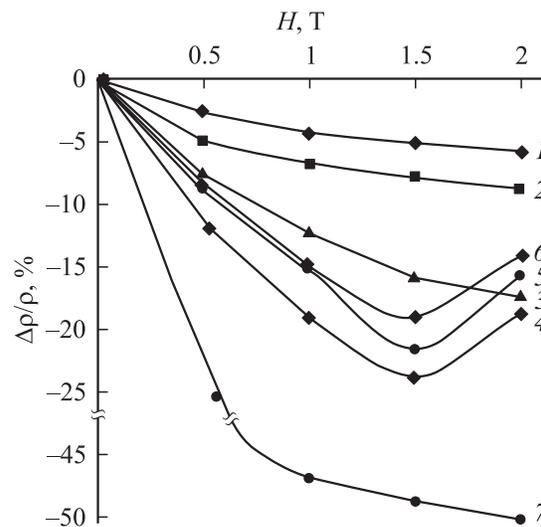
**Рис. 2.** Зависимости магнитосопротивления от магнитного поля при различных значениях удельного сопротивления образцов  $p\text{-Si(B,Mn)}$  (в темноте, при комнатной температуре, при  $E = 100 \text{ В/см}$ )  $\rho, \text{ Ом} \cdot \text{см}$ : 1 —  $2.5 \cdot 10^2$ , 2 —  $6.2 \cdot 10^2$ , 3 —  $6.3 \cdot 10^3$ , 4 —  $1.5 \cdot 10^4$ , 5 —  $6.5 \cdot 10^4$ , 6 —  $2 \cdot 10^5$ .

существенно не отличается от ПМС некомпенсированных (без марганца) образцов  $\text{Si(B)}$  с таким же удельным сопротивлением, значение ПМС в  $n\text{-Si(B,Mn)}$  немного меньше, чем в некомпенсированных образцах.

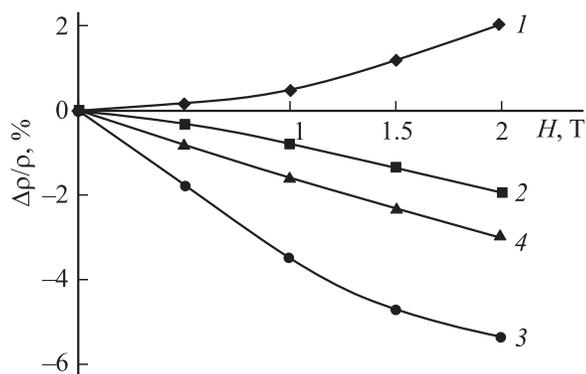
На рис. 2 приведено относительное изменение удельного сопротивления образцов компенсированного кремния ( $p\text{-Si(B,Mn)}$ ) с различным удельным сопротивлением при комнатной температуре в зависимости от напряженности магнитного поля в темноте (при  $E = 100 \text{ В/см}$ ). Результаты исследования показали, что в образцах с  $\rho \lesssim 5 \cdot 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  всегда имеет место небольшое ПМС. С ростом удельного сопротивления образцов  $p\text{-Si(B,Mn)}$  знак магнитосопротивления изменяется и появляется ОМС, значение которого растет с увеличением  $\rho$  и достигает своего максимального значения для образцов с  $\rho = (6-7) \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Дальнейшее увеличение удельного сопротивления образцов приводит к уменьшению ОМС, а для образцов с  $\rho \gtrsim (5-6) \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  магнитосопротивление опять изменяет знак и становится положительным.

Интересные результаты были обнаружены при исследовании магнитосопротивления образцов  $p\text{-Si(B,Mn)}$ , освещенных интегральным светом. Образцы освещались с двух противоположных сторон равномерно; интенсивность освещения регулировалась с помощью калиброванной сетки. Направление падения света совпадало с направлением магнитного поля. Установлено, что освещение существенно стимулирует ОМС  $p\text{-Si(B,Mn)}$ . На рис. 3 представлены зависимости ОМС от магнитного поля для образцов  $p\text{-Si(B,Mn)}$  с  $\rho \approx 6.2 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , освещенных светом различной интенсивности. Как видно из рисунка, значение ОМС увеличивается с ростом интенсивности освещения и достигает максимума при  $L = 150 \text{ лк}$ . При дальнейшем увеличении интенсивности освещения значение ОМС уменьшается. Результаты эксперимента показали, что при интенсивности освещения  $L \approx 1000 \text{ лк}$  магнитосопротивление изменяет знак, т. е. от ОМС переходит к ПМС. Таким образом, установлено, что на исследованных образцах ОМС, стимулированное светом, наблюдается в области интенсивности освещения  $0 < L < 1000 \text{ лк}$ , а максимальное значение имеет место при  $L = 150-180 \text{ лк}$ .

Нами исследована также зависимость магнитосопротивления образцов  $p$ -типа с  $\rho = 6.3 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  от магнитного поля при различных температурах (рис. 4). Результаты эксперимента показывают, что в этих материалах при  $T = 77 \text{ К}$  в исследуемой области магнитного поля всегда имеется только небольшое ПМС, значение которого растет с ростом  $H$  по закону  $\Delta\rho/\rho \propto H^2$  (кривая 1). С повышением температуры значение ПМС



**Рис. 3.** Зависимости магнитосопротивления от напряженности магнитного поля в образцах  $p\text{-Si(B,Mn)}$  с удельным сопротивлением  $\rho \approx 6.2 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  при комнатной температуре, постоянном электрическом поле  $E = 100 \text{ В/см}$  и различной интенсивности освещения  $L, \text{ лк}$ : 1 — 8, 2 — 32, 3 — 80, 4, 7 — 150, 5 — 320, 6 — 450. Зависимости 1-6 получены для образцов, изготовленных из исходного  $p\text{-Si(B)}$  с  $\rho = 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  (марки КДБ-10); зависимость 7 — из исходного  $p\text{-Si(B)}$  с  $\rho = 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  (марки КДБ-1).



**Рис. 4.** Зависимости магнитосопротивления от напряженности магнитного поля в образцах  $p\text{-Si(B,Mn)}$  с удельным сопротивлением  $\rho = 6.3 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  в темноте при  $E = 100 \text{ В/см}$  и температуре  $T, \text{ К}$ : 1 — 77, 2 — 135, 3 — 290, 4 — 320.

уменьшается, а при  $T = 130\text{--}140 \text{ К}$  появляется небольшое ОМС. Значение ОМС увеличивается с ростом температуры и достигает максимума при  $T = 290\text{--}300 \text{ К}$ . Дальнейшее увеличение температуры приводит к уменьшению ОМС.

На рис. 3 кривой 7 представлена зависимость ОМС от магнитного поля для образца  $p\text{-Si(B,Mn)}$  с удельным сопротивлением  $\rho \approx 6.2 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , но изготовленного на основе исходного кремния с удельным сопротивлением  $\rho = 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . В этом образце концентрация электроактивных атомов Mn составляет  $N_{\text{Mn}} \approx 2.1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  — больше, чем в образцах, данные для которых представлены кривыми 1–6. Как видно из рисунка, с увеличением концентрации атомов компенсирующей примеси, при одинаковых условиях ( $L, E, T, \rho$ ), значение ОМС увеличивается более чем в 2 раза. Эти данные демонстрируют возможность управлять значением ОМС в  $p\text{-Si(B)}$ , варьируя концентрацию Mn диффузионным методом. Ограничение концентрации марганца  $N_{\text{Mn}} \approx 2.1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  связано с растворимостью атомов Mn в кремнии.

Таким образом, в результате проведенных исследований показано, что для наблюдения максимального ОМС в кремнии, легированном бором и марганцем, должны осуществляться оптимальные условия: исходный материал —  $p\text{-Si(B)}$  с удельным сопротивлением  $\rho_{\text{st}} = 1\text{--}10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . После диффузии марганца образец должен оставаться дырочного типа проводимости с удельным сопротивлением  $\rho = (6\text{--}7) \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , электрическое поле должно быть  $E = 80\text{--}100 \text{ В/см}$ , интенсивность интегрального освещения  $L = 130\text{--}150 \text{ лк}$ , оптимальная температура  $T = 290\text{--}300 \text{ К}$ .

## Список литературы

- [1] М. Аше, Ю.Г. Завьялов, О.Г. Сарбей. Письма ЖЭТФ, **13**, 401 (1971).
- [2] К. Зеегер. *Физика полупроводников* (М., Мир, 1977).

- [3] Б.И. Болтакс, М.К. Бахадырханов и др. *Компенсированный кремний* (Л., Наука, 1972) с. 12–24.
- [4] М. Шалкаускас, А. Вашкяи. *Химическая металлизация пластмасс* (М., Химия, 1977) с. 133–134.

Редактор Т.А. Полянская

## Electric potential and light stimulation of a negative magnetic resistance in silicon doped with manganese

M.K. Bahadyrkhanov, O.E. Sattarov, Kh.M. Iliev, K.S. Ayupov, Tuerdi Wumaier

The Tashkent State Technical University,  
700095 Tashkent, Uzbekistan