

05.2;06

©1995

## АНОМАЛЬНОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ТОКА В СИЛЬНО КОМПЕНСИРОВАННОМ КРЕМНИИ

*М.К.Багадырганов, И.А.Каршибаев*

В сильно компенсированном (СК) кремнии, легированном марганцем (где концентрация свободных носителей намного меньше концентрации ионов бора и марганца  $n, p < N_B^-, N_{Mn}^+$ ), наблюдается ряд интересных и новых физических явлений, природа которых до конца еще не ясна [1,2]. В данной работе с целью выяснения механизма этих явлений исследована температурная зависимость холловской подвижности.

Для получения компенсированного кремния с различными удельными сопротивлениями  $\rho$  использовались исходные образцы монокристаллического кремния  $p$ -типа КДБ-10 с концентрацией бора  $N_B = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Диффузия марганца в кремний осуществлялась из газовой фазы по известной технологии [3]. Длительность и температура диффузионного отжига подбирались таким образом, чтобы получить образцы  $\text{Si}(\text{Mn})$   $n$ -,  $p$ -типов проводимости с удельным сопротивлением  $\rho = 10^2 - 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  при 300 К. Таким образом, для каждого удельного сопротивления было изготовлено несколько образцов. Исследование температурной зависимости подвижности носителей тока проводилось методом, описанным в [4] (из ЭДС Холла). Как известно, использование эффекта Холла для определения абсолютного значения концентрации и подвижности носителей тока в СК образцах приводит к некоторым ошибкам. Однако мы, не претендуя на абсолютные значения концентрации и подвижности носителей тока в СК образцах  $\text{Si}(\text{Mn})$ , хотели показать закономерности изменения их с температурой. Достоверность экспериментальных результатов достигалась путем измерений нескольких образцов с одинаковым  $\rho$  в одних и тех же условиях. Действительно, как показали эксперименты, в образцах с одинаковыми  $\rho$  закономерность  $n(T)$  и  $\mu(T)$  сохраняется. Для большей достоверности полученных результатов нами также были исследованы контрольные исходные (некомпенсированные) образцы марки БКДБ с  $\rho = 5 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ .

Эксперименты показали, что величина и вид температурной зависимости холловской подвижности существенно различаются в образцах с различным  $\rho$  (рис. 1). В контрольных образцах (нелегированных с  $\rho = 10^4$  Ом·см) зависимость  $\mu(T)$  имеет обычный вид, т. е. в исследуемой области температур подвижность носителей тока с ростом температуры уменьшается по закону  $T^{-3/2}$  (кривая 1). В образцах с примесью марганца, с  $\rho = 10^2$  Ом·см подвижность носителей с ростом температуры монотонно уменьшается, но при этом падает быстрее, чем в исходном кремнии (кривая 2). С ростом  $\rho$  существенно изменяется наклон  $\mu(T)$  и наблюдается аномальная зависимость подвижности носителей тока от температуры (кривые 3–5). С ростом температуры значение подвижности растет и при  $T = T_M$  имеет максимум, затем резко уменьшается, имея минимум при некоторой  $T = T_m$ , дальнейший рост температуры приводит к росту подвижности носителей тока. С ростом  $\rho$  образцов значение  $T_M$  и  $T_m$  смещается в сторону высоких температур. Здесь необходимо отметить, что в области  $T_M$ , в образцах с  $\rho > 10^3$  Ом·см значение подвижности становится больше, чем в исходном кремнии и в образцах Si(Mn) с  $\rho = 10^2$  Ом·см.

На рис. 1 также представлена температурная зависимость концентрации носителей тока для СК образца Si(Mn) с  $\rho = 1.2 \cdot 10^5$  Ом·см. Как видно из рисунка, до некоторой температуры  $T_1$  существенного изменения концентрации не наблюдается, а при  $T > T_1$  концентрация носителей тока резко увеличивается (кривая б).

На рис. 2 показано влияние интегрального освещения на температурную зависимость холловской подвижности в образцах Si(Mn) с  $\rho = 10^5$  Ом·см. Как видно из рисунка, с ростом интенсивности освещения аномальное поведение  $\mu(T)$  выявляется более четко, при этом положение  $T_M$  и  $T_m$  смещается в область низких температур и наблюдается появление второго минимума при  $T_{m1}$ .

Эти результаты дают основание считать, что в исследуемой области температур в образцах Si(Mn) рассеяние носителей тока на колебаниях решетки не является определяющим.

Температурный ход изменения подвижности носителей тока в зависимости от удельного сопротивления не может быть объяснен ростом концентрации ионов примеси марганца, так как в образцах Si(Mn) с  $\rho = 2 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^5$  Ом·см концентрация ионов марганца практически одинакова, меняется не более чем на 1% и составляет  $2 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>, т. е. равна концентрации бора в исходном материале.

В исследуемой области температур практически все атомы бора и марганца ионизованы и их концентрация на не-

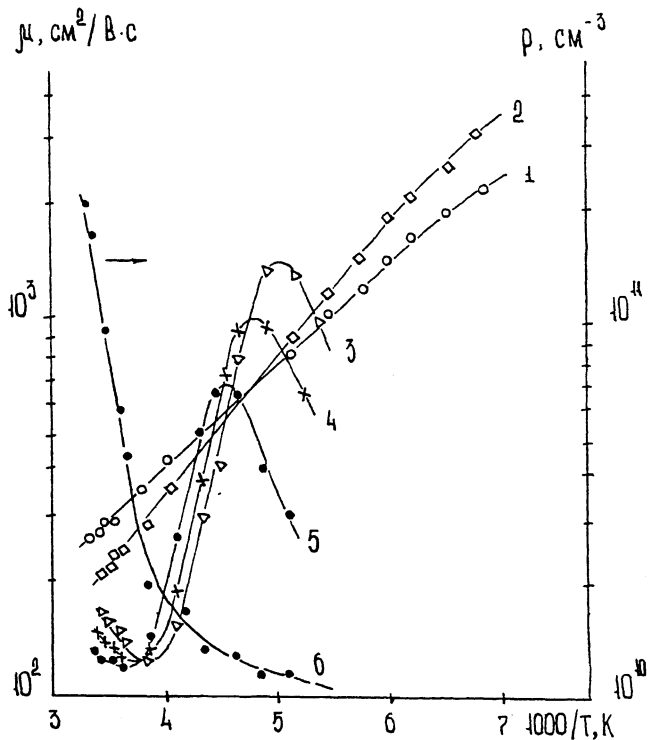


Рис. 1. Зависимость подвижности носителей тока от температуры для образцов  $p\text{-Si}(\text{Mn})$  с различным удельным сопротивлением: 1 — исходный кремний с  $\rho = 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ; 2 —  $1.5 \cdot 10^2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ; 3 —  $2 \cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ; 4 —  $6 \cdot 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ; 5 —  $1.2 \cdot 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ; 6 — температурная зависимость концентрации для СК образца с  $\rho = 1.2 \cdot 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ .

сколько порядков (7–10) больше концентрации носителей тока. С другой стороны, в отличие от бора, марганец в кремнии может находиться в различных зарядовых состояниях (как  $\text{Mn}^0$ ,  $\text{Mn}^+$ ,  $\text{Mn}^{++}$ ) и образует комплексы типа  $(\text{MnV})_0$ ,  $(\text{Mn})_2$ ,  $(\text{Mn})_4$ . Как указано в работах [5,6], зарядовое состояние комплексов существенно зависит от степени компенсации, с ростом последнего увеличивается не только доля концентрации заряженных центров марганца, но и кратность зарядовых состояний комплексов  $(\text{Mn})_2^{+n} \dots (\text{Mn})_4^{+n}$  и могут образоваться протяженные дефекты незранированных комплексов марганца типа трофической цепи [7,8]. Подтверждением этого предположения может служить тот факт, что в перекомпенсированных образцах  $n\text{-Si}(\text{Mn})$ , где основная часть атомов марганца находится в однократно заряженном

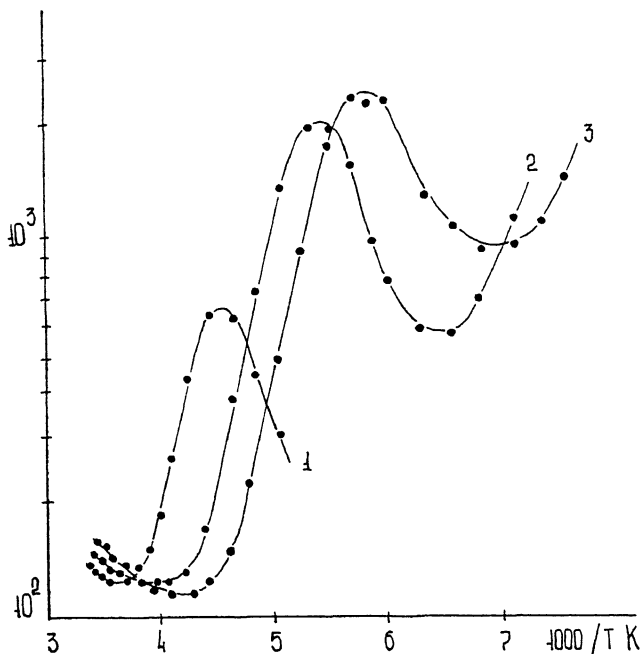
$\mu, \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ 

Рис. 2. Влияние интенсивности освещения на подвижность носителей тока в СК образце  $\text{Si}(\text{Mn})$  с  $\rho = 1.2 \cdot 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ; 1 — темновой; 2 — при 0.8 лк; 3 — при 1.6 лк.

состоянии, такие аномалии температурной зависимости подвижности носителей тока не наблюдаются.

Поэтому можно предположить, что в исследуемых образцах рассеяние носителей тока определяется одновременно рассеянием на колебаниях решетки и зарядовых центрах марганца. Однако тогда не понятно, почему наблюдается аномальное поведение подвижности носителей тока с изменением температуры. В связи с этим можно предположить, что повышение температуры или интенсивности освещения приводит к перезарядке центров марганца, в результате чего меняется не только зарядовое состояние, но и структура самих комплексов. Для каждой температуры и интенсивности освещения в зависимости от зарядового состояния комплексов существуют свои "рассеивающие центры", которые определяют подвижность носителей тока при данной температуре; с изменением температуры кристалла "работают" другие, более эффективные центры, что приводит к осцилляционному виду зависимости подвижности от температуры. Более подробное объяснение этого явления требует дальнейшего исследования.

## Список литературы

- [1] Багадырханов М.К., Хамидов А. // ФТП. 1979. Т. 13. В. 5. С. 1036-1038.
- [2] Багадырханов М.К., Зайнабидинов С., Камиллов Т.С. и др. // ФТП. 1974. Т. 8. В. 12. С. 2263-2265.
- [3] Багадырханов М.К., Болтакс Б.И., Куликов Г.С. // ФТТ. 1972. Т. 14. В. 6. С. 1671-1676.
- [4] Кучис Е.В. Гальваномангнитные эффекты и методы их исследования. М.: Радио и связь, 1990. С. 199.
- [5] Аскарлов Ш.И., Багадырханов М.К., Мастеров В.Ф. и др. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 7. С. 1308.
- [6] Фистуль В.И., Казакова В.М., Бобровников Ю.А. и др. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 5. С. 939-942.
- [7] Авиллов А., Оксенгендлер Б.Р., Хамраева М.Р. и др. // УФЖ. 1992. № 5. С. 64.
- [8] Заячук Д.М. // Письмо в ЖЭТФ. 1991. Т. 547. № 6. С. 398-340.

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

Поступило в Редакцию  
4 августа 1994 г.  
В окончательной редакции  
13 февраля 1995 г.