

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННОГО ФОСФОРом И СУРЬМОЙ КРЕМНИЯ

Абрамов В. В., Кульбачинский В. А., Кытин В. Г., Тимофеев А. Б.,
Ульяшин А. Г.

Измерена электропроводность сильно легированных с помощью ионной имплантации Si <P>, Si <Sb>, Si <Sb + P> в области температур $4.2 < T < 300$ К. Результаты интерпретируются в рамках модели, учитывающей возможную энергетическую зависимость плотности делокализованных состояний в примесной зоне.

Введение. Электронный транспорт в сильно легированных, слабокомпенсированных полупроводниках интенсивно исследуется (экспериментально и теоретически) в связи с большим интересом к задаче о переходе металл—диэлектрик за счет локализации [1–7]. В системах, где перекрытие электронных волновых функций существенно, становятся важными эффекты электрон-электронного взаимодействия, которые, однако, трудно отделить от эффектов, вызываемых внутренним беспорядком в расположении примесей. Для независимого контроля за соответствующими параметрами в ряде работ исследовалась примесная система в полупроводнике, содержащем два типа доноров: Si <P, As> [8, 9], Si <P, Sb> [10], Si <P, Se> [11]. Двойное легирование приводит к дополнительному энергетическому беспорядку без существенного влияния на эффекты электрон-электронного взаимодействия [12].

В настоящей работе исследуются транспортные свойства кремния при одновременном присутствии доноров двух типов — фосфора и сурьмы. Результаты интерпретируются в рамках модели, учитывающей энергетическую зависимость плотности электронных состояний в формируемой примесной зоне.

Методика измерений и образцы

Легирование кремния проводилось методом высокодозной имплантации ионов P^+ и Sb^+ с энергиями $E = 80$ и 90 кэВ соответственно и последующим лазерным отжигом дефектного слоя (длина волны лазерного излучения $\lambda = 1.06$ мкм, длительность импульса $\tau = 50$ нс). Плотности энергии в отжигающем импульсе, а также некоторые параметры исследованных образцов приведены в таблице.

Изменение характеристик примесной системы (концентрации электрически активных доноров, положения уровня Ферми) достигалось (как и в работе [13]) варьированием плотности энергии в отжигающем лазерном импульсе.

Исследование электропроводности образцов проводилось в температурном интервале $4.2—300$ К по четырехконтактной схеме с использованием прижимных контактов или контактов из серебряной пасты. Измерения проводились в области линейности вольт-амперной характеристики. Результаты не зависели от способа

Образец	Доза имплантированной примеси, см ⁻²	Плотность энергии в отжигающем импульсе, Дж/см ²	Сопротивление, Ом/□	
			300 К	4.2 К
Si <P> 0	10 ¹⁶	0	7·10 ³	1.9·10 ⁴
Si <P> 1	10 ¹⁶	2.5	81	63
Si <P> 2	10 ¹⁶	2.3	80	53
Si <Sb> 08	10 ¹⁶	0	8·10 ³	2·10 ¹¹
Si <Sb> 5	10 ¹⁶	2.3	79	56
Si <Sb> 6	10 ¹⁶	2.5	74	52
Si <P + Sb> 01	10 ¹⁶ + 10 ¹⁶	0	10 ⁴	2·10 ⁵
Si <P + Sb> 9	10 ¹⁶ + 10 ¹⁶	2.3	62	39
Si <P + Sb> 10	10 ¹⁶ + 10 ¹⁶	2.5	56	35

создания контактов. Магнитное поле до 6 Т создавалось сверхпроводящим соленоидом.

Результаты измерений

На рис. 1 приведены зависимости сопротивления от температуры $R(T)$ пленок Si <P>, Si <Sb> и Si <P + Sb> без лазерного отжига. Функция $R(T)$ во всех случаях имеет полупроводниковый ход, хотя и не спрямляется в координатах $\log R - 1/T$. Добавочное имплантирование фосфора в пленки Si <Sb> понижает их сопротивление, а добавочное имплантирование сурьмы в пленки Si <P> повышает их сопротивление.

Лазерный отжиг приводит к качественному изменению зависимостей $R(T)$. На рис. 2 приведены кривые для пленок Si <P> (1, 2), Si <Sb> (3, 4) и Si <P + Sb> (5, 6) при различных энергиях лазерного отжигающего импульса. Отметим металлическое поведение сопротивления $R(T)$, причем сопротивление пленок Si <P> больше сопротивления пленок Si <Sb>, а наименьшим сопротивлением обладают пленки Si <Sb + P>. Кроме того, увеличение энергии лазерного импульса приводит к понижению сопротивления. Поперечное магнитосопротивление неотожженных пленок сначала отрицательное, а затем переходит в положительное.

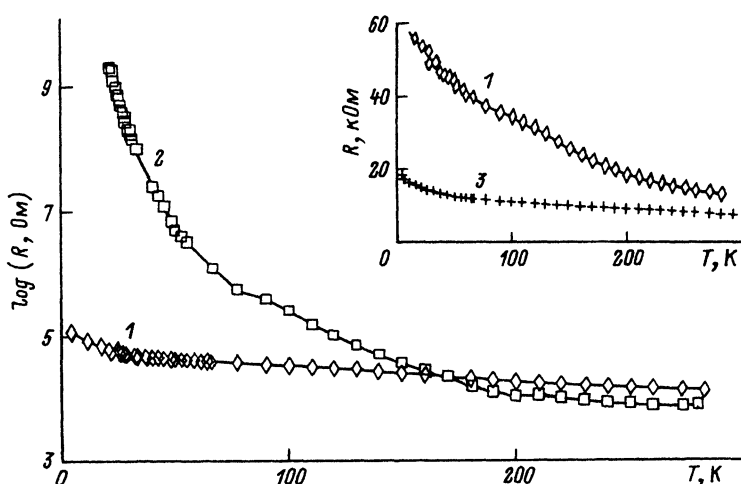


Рис. 1. Зависимости логарифма сопротивления от температуры.

На вставке — зависимость сопротивления от температуры. Образцы: 1 — Si (P + Sb) 01, 2 — Si (Sb) 08, 3 — Si (P) 0.

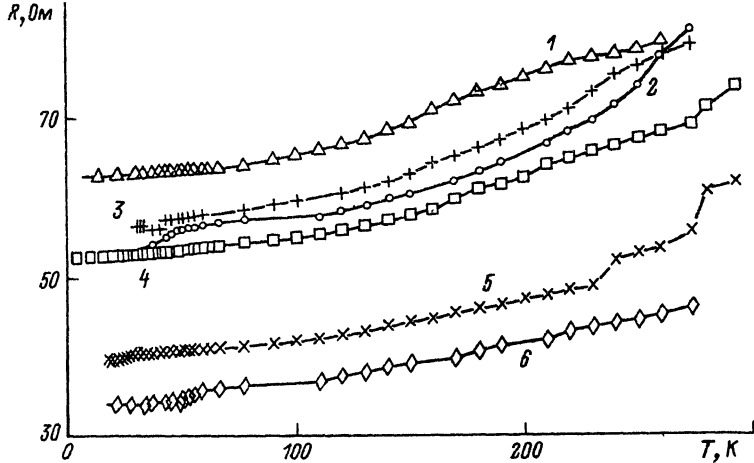


Рис. 2. Зависимости сопротивления от температуры образцов.
 1 — Si (P) 1, 2 — Si (P) 2, 3 — Si (Sb) 5, 4 — Si (Sb) 6, 5 — Si (P + Sb) 9, 6 — Si (P + Sb) 10.

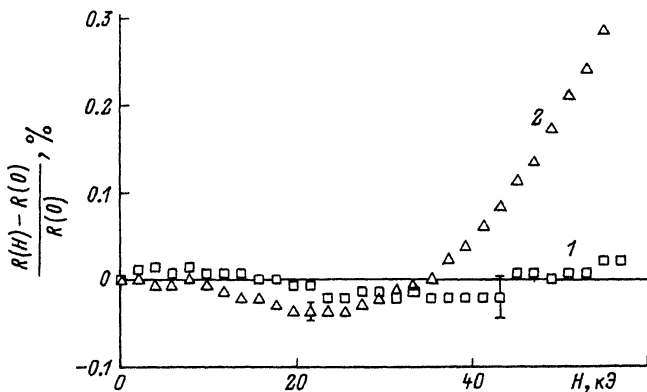


Рис. 3. Зависимости относительного изменения сопротивления при $T = 4.2$ К от магнитного поля образцов.

1 — Si (P + Sb) 10, 2 — Si (P + Sb) 01.

В отожженных пленках в пределах точности измерений для магнитных полей до 60 кЭ магнитосопротивление отсутствует (рис. 3).

Обсуждение результатов

Наблюдаемые эффекты уменьшения сопротивления при дополнительной имплантации с последующим лазерным отжигом могут быть обусловлены следующим. При лазерном отжиге, как известно, наряду с электрической активацией имплантируемых примесных центров происходит неполное восстановление кристаллической структуры кремния, что может привести к созданию вакансионных комплексов акцепторного типа [14]. Возникающая таким путем дополнительная компенсация влияет на положение уровня Ферми в примесной зоне из делокализованных электронных состояний более мелких доноров (в нашей ситуации это примесь сурьмы). Повышение плотности состояний на уровне Ферми при его смещении в глубь примесной зоны и приводит к уменьшению сопротивления. Эффективная электрическая активация имплантированных

примесных атомов в результате лазерного отжига и соответствующая смена поведения функции $R(T)$ объясняются делокализацией электронных состояний в примесной зоне.

В небольших магнитных полях у неотожженных образцов наблюдается отрицательное магнитосопротивление, связанное, скорее всего, со слабой локализацией. В больших полях магнитосопротивление становится положительным, что характерно для систем с прыжковой проводимостью.

По-видимому, в результате лазерного отжига происходят более равномерное распределение имплантированных примесей и перекрытие их волновых функций, в результате чего возникает металлическая система с малыми длинами свободного пробега. При этом из-за возникающей большой проводимости после отжига образца Si <Sb + P> 10 относительная величина магнитосопротивления становится малой (рис. 3, кривая 1).

В заключение авторы выражают благодарность И. П. Звягину за полезное обсуждение результатов работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Paalanen M. A., Bhatt R. N. // *Physica B*. 1991. V. 169. P. 223—230.
- [2] Hopkins P. F. et al. // *Phys. Rev. B*. 1989. V. 39. N 17. P. 12708—12716.
- [3] Chen Gang et al. // *Physica B*. 1990. V. 165. N 166. P. 303—304.
- [4] Finlayson D. M. et al. // *J. Phys. Cond. Matt.* 1990. V. 2. N 32. P. 6735—6741.
- [5] Long A. P., Pepper M. // *Sol. St. Electron.* 1985. V. 28. N 1-2. P. 61—72.
- [6] Thomas G. A. // *Phys. Mag. B*. 1985. V. 34. N 3. P. 479—498.
- [7] Mott N. F., Kaveh M. // *Adv. Phys.* 1985. V. 34. N 3. P. 329—401.
- [8] Newman P. F., Holcomb D. F. // *Phys. Rev. Lett.* 1983. V. 51. N 23. P. 2144—2147.
- [9] Ferreira da Silva A. // *Phys. Rev. Lett.* 1987. V. 59. N 11. P. 1263.
- [10] Ferreira da Silva A. // *Phys. Scr.* 1986. V. T14. P. 27—28.
- [11] Абрамов В. В., Брандт Н. Б., Кульбачинский В. А., Тимофеев А. Б., Уляшин А. Г., Шлопак Н. В., Горольчук И. Г. // *ФТП*. 1991. Т. 25. В. 3. С. 513—517.
- [12] Szmulowicz F., Bloch K. T. // *Phys. Rev. B*. 1988. V. 38. N 12. P. 8480—8482.
- [13] Kwok H. L. et al. // *J. Matter. Sci. Lett.* 1986. V. 5. N 6. P. 633—634.
- [14] Parmigiani F. et al. // *Phys. Rev. B*. 1990. V. 41. N 6. P. 3728—3732.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

Получена 21.10.1991
Принята к печати 26.12.1991