

## ПЕРЕХОД МЕТАЛЛ—ДИЭЛЕКТРИК В $n$ -Si <P, Sb> ПРИ ВЫСОКИХ ОДНООСНЫХ ДАВЛЕНИЯХ

Ермаков Е. Н., Коломоец В. В., Панасюк Л. И., Родионов В. Е.

Известно, что переход металл—диэлектрик (МД) в полупроводниках реализуется при изменении степени легирования кристаллов. В этом случае с увеличением концентрации примеси примесные состояния преобразуются в примесные зоны, которые в сильно легированных кристаллах перекрываются с зоной проводимости (или валентной зоной) [1]. В экспериментах с одноосно деформированными кристаллами  $n$ -Si<P> в области температур от 2 до 40 мК был получен переход от активационной проводимости к металлической проводимости

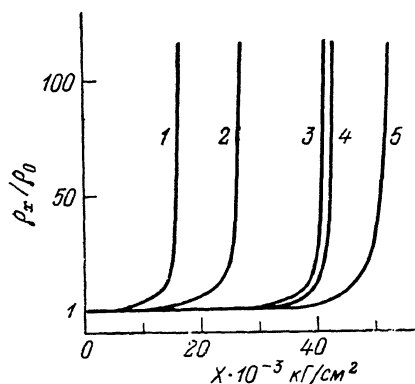


Рис. 1. Зависимости изменения удельного сопротивления кристаллов  $n$ -Si<Sb> (1, 3) и  $n$ -Si<P> (2, 4, 5) от механического напряжения сжатия  $X \parallel [111]$ .

Концентрация легирующих примесей,  $m^{-3}$ :  
1 —  $3.12 \cdot 10^{24}$ , 2 —  $4.0 \cdot 10^{24}$ , 3 —  $5.8 \cdot 10^{24}$ ,  
4 —  $6.7 \cdot 10^{24}$ , 5 —  $8.2 \cdot 10^{24}$ .

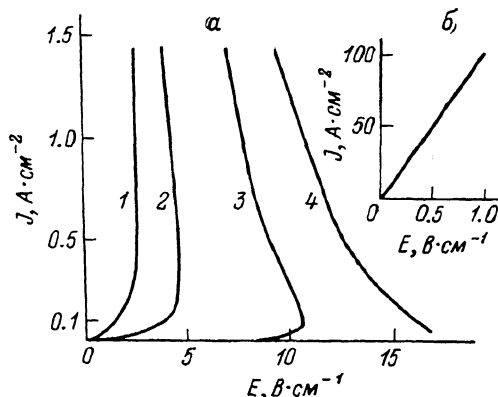


Рис. 2. ВАХ кристаллов  $n$ -Si<P> (образец 2, рис. 1) при различных значениях  $X$ .

$X$ ,  $kg/cm^2$ : 1 — 30 000, 2 — 31 000, 3 — 33 000, 4 — 34 000;  $J=f(E)$  — для недеформированного кристалла ( $X=0$ ).

(переход МД), обусловленный изменением при деформации долино-орбитального расщепления [2]. Ранее [3] было установлено, что в  $n$ -Si<P> имеется выделенное направление оси деформации ( $X \parallel [111]$ ), которое характеризуется в области высоких  $X$  заметным увеличением энергии ионизации мелких доноров. В связи с этим нами была предпринята попытка получить при более высокой температуре ( $T=4.2$  К) и в более широкой области концентраций примеси в вырожденных кристаллах  $n$ -Si<Sb> и  $n$ -Si<P> обратный по отношению к [2] переход МД, т. е. переход от металлической проводимости к активационной проводимости.

Эксперименты были проведены на образцах кремния, ориентированных в направлении [111], на рентгеновской установке с точностью  $\pm 15'$ . Использовались образцы кремния, легированные примесью фосфора до концентраций  $(4.0 \div 8.2) \cdot 10^{24}$  и примесью сурьмы до концентраций  $(3.12 \div 5.8) \cdot 10^{24} m^{-3}$ . Измерения выполнялись по оригинальной методике, позволяющей проводить эксперименты при одноосных давлениях  $X$ , достигавших значений 3—5 ГПа. Установка, использованная для измерений, позволила осуществить автоматическую запись зависимостей  $\rho_x/\rho_0=f(X)$  и вольт-амперных характеристик (ВАХ) [ $J=f(E)$ ]. Измерения проводились при температуре жидкого гелия.

Известно [4], что концентрация примеси сурьмы в кремнии в интервале  $(3.12 \div 5.8) \cdot 10^{24}$  и примеси фосфора в кремнии в интервале  $(4.0 \div 8.2) \cdot 10^{24} m^{-3}$  обеспечивает в недеформированных кристаллах ( $X=0$ ) металлический тип проводимости. Об этом же свидетельствуют и холловские измерения, проведенные

нами на этих же образцах в интервале 4.2—300 К. На рис. 1 представлены зависимости удельного сопротивления кристаллов с разной концентрацией примеси Sb и P от механического напряжения одноосного сжатия  $X$ . Видно, что в области высоких  $X$  наблюдается значительное (на 3—4 порядка) увеличение удельного сопротивления  $\rho$  кристаллов. Мы связываем это увеличение  $\rho$  с деформационно индуцируемым переходом от металлической проводимости к активационной проводимости. Исходной причиной этого перехода является деформационная непараболичность  $\Delta_1$ -долин  $c$ -зоны кремния [5]. В данном случае при высоких  $X \parallel [111]$  заметно возрастают значения компонент поперечной эффективной массы электронов, что приводит к отрыву примесной зоны от дна  $c$ -зоны и переходу к активационной проводимости.

С ростом уровня легирования кристаллов переход МД смещается в область более высоких значений  $X$ . Это связано с увеличением энергии Ферми в недеформированных кристаллах. При этом отрыв примесной зоны от дна  $c$ -зоны достигается при более высоких одноосных давлениях  $X$ .

Наличие деформационно индуцируемого перехода МД подтверждается образованием линейных ВАХ, характерных для малых  $X$ , в нелинейные  $S$ -образные ВАХ в области высоких  $X$  (рис. 2). Как показывает анализ ВАХ, поле ударной ионизации, непосредственно связанное с энергией активации  $\epsilon_a$ , резко возрастает в области перехода МД с ростом  $X$ . Следовательно, с ростом  $X$  возрастает отрыв примесной зоны от дна зоны проводимости.  $S$ -образный характер ВАХ определяется переходом электронов на порог подвижности при их разогреве в процессе ударной ионизации.

Отметим, что все зависимости  $\rho_x/\rho_0=f(X)$  были записаны при предельно малых значениях тока через образцы, соответствовавшие начальному (восходящему) участку ВАХ (рис. 2).

Таким образом, на основе анализа особенностей деформационной перестройки энергетического спектра  $c$ -зоны кремния предсказан и реализован при  $T=4.2$  К и высоких  $X \parallel [111]$  переход от металлической проводимости к активационной проводимости. Переход МД наблюдается в кристаллах  $n$ -Si, легированных примесями фосфора и сурьмы до концентраций, более чем в 2 раза превышающих критическую концентрацию перехода МД. Исходной причиной реализованного перехода МД является деформационная непараболичность  $\Delta_1$ -долин, возникающая вследствие снятия при  $X \parallel [111]$  вырождения ветвей  $c$ -зоны в точке  $X_1$  на краю зоны Бриллюэна и приводящая к увеличению компонент поперечной эффективной массы электронов и отрыву примесной зоны от дна  $c$ -зоны в области высоких  $X$ .

#### Список литературы

- [1] Ghazali A., Leroux Hugon P. // Phys. Rev. Lett. 1978. V. 41. N 22. P. 1569—1572.
- [2] Paalanen M. A., Rosenbaum T. R., Thomas G. A., Bhatt R. N. // Phys. Rev. Lett. 1982. V. 48. N 8. P. 1284—1287.
- [3] Баранский П. И., Коломоец В. В., Охрименко Ю. А., Федосов А. В. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 2. С. 361—364.
- [4] Ferreira da Silva A. // Phys. Rev. B. 1988. V. 37. N 9. P. 4799—4800.
- [5] Baranski P. I., Kolomoets V. V., Korolyk S. S. // Phys. St. Sol. (b). 1989. V. 116. P. K109.

Институт полупроводников  
АН УССР  
Киев

Получено 21.06.1990  
Принято к печати 10.09.1990