

МЕХАНИЗМ ТЕНЗОЭФФЕКТА В n -Si<Mn> ПРИ ВСЕСТОРОННЕМ ГИДРОСТАТИЧЕСКОМ СЖАТИИ

А. Абдураимов, С. З. Зайнабинидов, А. Тешабаев,
О. О. Маматкаримов, О. Химматкулов

Ташкентский государственный университет им. В. И. Ленина, 700095, Ташкент, Республика Узбекистан

(Получено 14.01.1992. Принято к печати 7.05.1992)

Как известно [1], сильно компенсированные образцы Si<Mn> и структуры на их основе являются чувствительными к внешним воздействиям — к температуре, собственному и инфракрасному излучению, к магнитным и электрическим полям и др. В последние годы обнаружена чувствительность этих материалов к ориентированной деформации [2]. Исследованию тензоэффекта в образцах Si<Mn> при ориентированной деформации посвящено немало работ, но данные по тензосопротивлению и механизмам его проявления в динамическом режиме воздействия всестороннего сжатия в настоящее время в литературе отсутствуют.

В данной работе приведены результаты исследований эффекта тензосопротивления и механизмов его проявления при всестороннем гидростатическом сжатии (ВГС) в сильно компенсированных образцах n -Si<Mn>, а также в контрольных (термообработанных) и исходных p -Si.

Сильно компенсированные образцы n -Si<Mn> были получены методом [1] высокотемпературной ($T = 1150^\circ\text{C}$) диффузии Mn в p -Si с удельным сопротивлением $\rho = 4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, при идентичных условиях отжигались и контрольные образцы. Образцы имели вид прямого параллелепипеда с размерами $2 \times 2 \times 5 \text{ мм}$ и кристаллографическую ориентацию [111]. Электрические параметры исследованных n -Si<Mn> и контрольных образцов приведены в таблице. Видно, что исходные образцы p -Si после диффузии Mn приобрели электронный тип проводимости, а в контрольных образцах дырочная проводимость сохранилась, при этом проводимость и подвижность дырок уменьшились в несколько раз.

Электрические параметры исследуемых образцов

№ образца	Образец	$T_{\text{диф.}}^\circ\text{C}$	$t_{\text{диф.}} \text{ ч}$	Тип проводимости	ρ , Ом · см	μ , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	Концентрация, см^{-3}
1	Si 	—	—	p	4.2	350	$4.25 \cdot 10^{15}$
2	Si 	1150	2	p	40	201	$7.77 \cdot 10^{14}$
3	Si <B, Mn>	1150	2	n	$4.3 \cdot 10^4$	992	$1.47 \cdot 10^{11}$

Всестороннее гидростатическое сжатие образцов проводилось в автономной камере (бомбе) высокого давления, изготовленной из бериллиевой бронзы [3]. Исследования тензосопротивления и эффекта Холла в образцах в отличие от [3] проводились непосредственно под воздействием давления.

Измерения тензосопротивления показали, что удельное сопротивление во всех образцах с ростом ВГС ($T = 300 \text{ К}$) уменьшается (рис. 1), при этом наибольшие изменения ρ наблюдаются в сильно компенсированных образцах n -Si<Mn> и наименьшие изменения — в контрольных. Следует заметить, что кривые зависимости $\rho = f(P)$ независимо от типа проводимости образцов имеют одинаковый характер, т. е. с ростом давления ρ уменьшается.

Измерения эффекта Холла в данных образцах и условиях ВГС показали, что концентрация дырок в исходных и контрольных образцах не изменяется

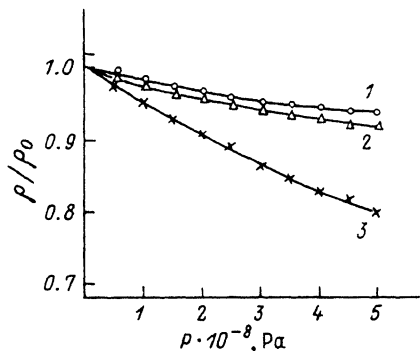


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления от давления (ВГС) при $T = 300$ К в образцах: 1 — исходных p -Si(B), 2 — контрольных, 3 — n -Si(Mn).

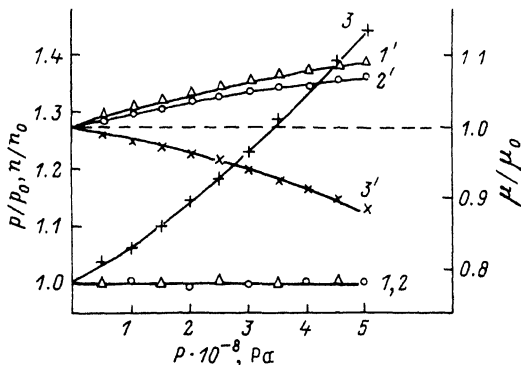


Рис. 2. Зависимости концентрации (1—3) и подвижности (1'—3') носителей тока от давления (ВГС) при $T = 300$ К в образцах: 1, 1' — исходных p -Si(B); 2, 2' — контрольных; 3, 3' — n -Si(Mn).

(рис. 2, прямые 1, 2), а концентрация электронов в n -Si<Mn> заметно увеличивается (рис. 2, кривая 3).

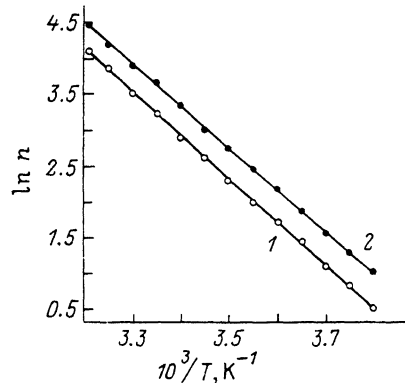
Из теории тензоэффекта [4] известно, что при деформации разрешенные зоны и примесные уровни в полупроводниках смещаются, и при этом энергетическая щель между примесными уровнями и разрешенными зонами в зависимости от скорости и направления их смещения может увеличиваться или уменьшаться. Полученные зависимости $n = f(P)$ в исходных и контрольных образцах согласуются с теорией тензоэффекта, так как мелкие примесные уровни в кремнии при комнатной температуре являются полностью опустошенными, а глубокие примесные уровни могут быть частично ионизованными [5]. При воздействии давления изменение степени заполнения глубоких уровней приводит к изменению концентрации носителей тока в разрешенных зонах [4].

На рис. 2 (кривые 1'—3') приведены зависимости подвижности дырок и электронов при ВГС в исходных, контрольных и n -Si<Mn>-образцах соответственно. Видно, что значения подвижности основных носителей в исходных и контрольных образцах увеличиваются с ростом величины ВГС, а в n -Si<Mn> уменьшаются.

Согласно теории тензоэффекта, в монокристаллах кремния при деформации происходит смещение валентной зоны в целом, и при изотропном (всестороннем) сжатии в отличие от анизотропного (одноосного) сжатия не происходит снятия вырождения ветвей энергии легких и тяжелых дырок в точке $k = 0$. Поэтому тензоэффект в p -Si при ВГС выражен слабее по сравнению с ориентированным сжатием [2], при этом некоторый рост подвижности дырок в p -Si при ВГС, возможно, связан с уменьшением энергии дырок, так как потолок валентной зоны в данных условиях сжатия смещается вверх [4]. Так как скорость роста подвижности дырок при ВГС (рис. 3, кривая 2) в контрольных образцах несколько меньше, чем в исходных, естественно предположить о возможности существования другого механизма деформации, приводящего к изменению подвижности дырок, и который можно связать с увеличением потенциала рассеивающих полей неконтролируемых термодоноров, микродефектов и примесных облаков, образующихся после термообработки кремния [6].

Различными методами было установлено [1], что наличие в объеме сильно компенсированного Si<Mn> кластерных образований Mn приводит к возникновению неоднородного распределенного по объему кристалла статического электрического потенциала с большой амплитудой. Поэтому, учитывая то, что увеличение концентрации электронов в n -Si<Mn> при ВГС приводит к увеличению

Рис. 3. Температурные зависимости $\ln n = f(10^3/T)$ в образцах n -Si(Mn) в отсутствие давления (1) и при давлении (ВГС) $P = 5 \cdot 10^8$ Па (2).



$$n = n_0 \exp \left(- (E_{Mn} - \alpha P) / kT \right), \quad (1)$$

где E_{Mn} — энергия ионизации уровня Mn, α — барический коэффициент изменения энергии ионизации уровня Mn, P — значение приложенного ВГС.

На рис. 3 приведены температурные зависимости концентрации электронов $\ln n = f(10^3/T)$ (прямая 1 при $P=0$ и прямая 2 при $P=5 \cdot 10^8$ Па), полученные из измерений эффекта Холла в образцах n -Si<Mn> при ВГС в температурном интервале $T = 203 \div 313$ К. Видно, что при ВГС энергия ионизации уровня Mn уменьшается.

Обработка экспериментальных результатов (рис. 2, кривая 3 и рис. 3) по формуле (1) дала среднее значение барического коэффициента изменения энергии ионизации уровня Mn $\alpha \approx 1.81 \cdot 10^{-11}$ эВ/Па, а энергии ионизации уровня Mn при $P=0$ $E_{Mn} \approx 0.52$ эВ.

Таким образом, из проведенных исследований следует, что тензоэффект в сильно компенсированных образцах Si<Mn> при ВГС в основном обусловлен изменением концентрации носителей тока. Необходимо отметить, что деформационные методы исследования в сильно компенсированных образцах позволяют «почувствовать» их неоднородную структуру даже в области комнатных температур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] М. К. Бахадырханов. Автореф. докт. дос., Л. (1983).
- [2] А. Абдураимов, М. К. Бахадырханов, А. А. Турсунов, Х. М. Илиев. ФТП, 19, 2052 (1985).
- [3] М. К. Бахадырханов, А. Абдураимов, Х. М. Илиев. ФТП, 22, 123 (1988).
- [4] А. Л. Полякова. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов, 168. М. (1979).
- [5] В. Л. Бонч-Бруевич, С. Г. Калашников. Физика полупроводников, 685. М. (1990).
- [6] Г. И. Воронкова, Т. Назаров. ФТП, 19, 1150 (1985).

Редактор: В. В. Чалдышев