

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ДИСЛОКАЦИЙ В КРЕМНИИ

В.А.Гражулис, В.В.Кведер, В.Ю.Мухина,
Ю.А.Осипьян

При исследовании кристаллов кремния P -типа (10^{13} атомов/ см^3 бора), содержащих дислокации, в интервале температур $T \leq 150\text{K}$ обнаружено резкое увеличение высокочастотной проводимости $\sigma(\omega)$ кристаллов на частотах $f = 9,5 \cdot 10^9$ Гц и $f = 3,3 \cdot 10^{10}$ Гц по сравнению с проводимостью на постоянном токе $\sigma(0)$. Отношение $\sigma(\omega)/\sigma(0) > 10^7$. Проводимость $\sigma(\omega)$ слабо зависит от температуры и увеличивается с ростом частоты, в то время как $\sigma(0)$ экспоненциально зависит от температуры с энергией активации $E_0 = 0,44$ эв. В работе делается вывод о том, что аномально большая высокочастотная проводимость деформированных кристаллов обусловлена проводимостью вдоль дислокаций.

Исследование свойств проводящих одномерных систем [1] к которым, по-видимому, можно отнести и дислокации в ковалентных кристаллах [2, 3] представляет значительный интерес. В случае дислокаций с краевыми компонентами проводимость вдоль ядер может реализоваться как за счет захваченных носителей, так и за счет электронов оборванных связей. Характер проводимости будет существенно зависеть от вида энергетического спектра [4], а также от нарушений трансляционной симметрии вдоль дислокаций, причем можно ожидать существенного различия в проводимости на постоянном токе и при высокой частоте [5].

Ниже сообщаются экспериментальные результаты, иллюстрирующие резкое увеличение СВЧ проводимости $\sigma(\omega)$ слабо легированных кристаллов кремния, содержащих дислокации, по сравнению с проводимостью тех же кристаллов при $\omega = 0$, а также особенности поведения $\sigma(\omega)$ при изменении температуры. Методика приготовления образцов и измерения $\sigma(0)$ и эффекта Холла описаны нами ранее [4]. Для того, чтобы можно было наблюдать проводимость непосредственно по дислокациям и исключить вклад прыжковой проводимости по примесям в данной работе исследовался чистый монокристаллический кремний, содержащий $\sim 10^{13} \text{см}^{-3}$ атомов бора (рис. 1).

Образцы деформировались двусторонним сжатием при напряжении $\tau \approx 9,6 \text{ кг/мм}^2$ и температуре 700°C . Величина деформации в сильно деформированных кристаллах достигала 4%; плотность дислокаций, оцененная по интенсивности сигнала ЭПР [3, 6], в деформированных образцах менялась в диапазоне $5 \cdot 10^7 \div 5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$. Измерения $\sigma(\omega)$ проводились на частотах $f = 9,5 \cdot 10^9$ Гц и $3,3 \cdot 10^{10}$ Гц . Проводимость определялась по изменению добротности СВЧ резонатора при внесении в него образца. Считалось, что проводимость пропорциональна СВЧ потерям в образце. Использовались как медные, так и сверхпроводящий (ниобиевый) резонаторы. Последний вакуумировался, а температура образца, приклеенного на сапфировый стержень, пропущенный через отверстие

в дне резонатора, менялась при помощи нагревателя, имеющегося на наружном конце сапфирового стержня.

Добротность измерялась по полуширине резонансной кривой резонатора. При этом использовалась система аналогичная [7], дающая узкие (шириной ~ 5 $\mu\text{ц}$) метки частоты. При низких добротностях измерения проводились по коэффициенту связи резонатора, при высоких ($> 5 \cdot 10^4$) – по времени затухания колебаний в резонаторе после импульса СВЧ генератора.

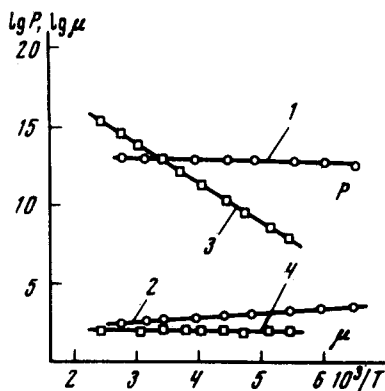


Рис. 1. Зависимость концентрации дырок (P) и их подвижности в исходном образце – \circ и в деформированном с деформацией 1,6% – \square

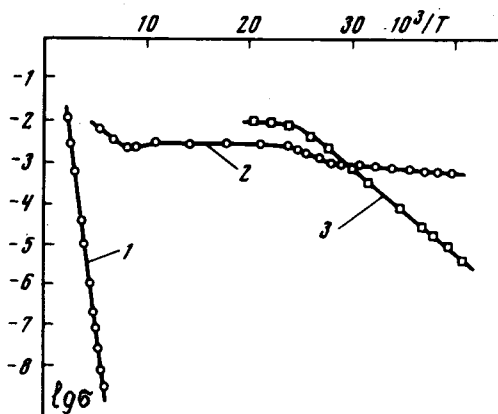


Рис. 2. Зависимость проводимости от температуры: 3 – $\sigma(0)$ и $\sigma(\omega)$ частота 9,3 Гц , 1 – $\sigma(0)$ – проводимость на постоянном токе образца с деформацией 1,6%, 2 – проводимость $\sigma(\omega)$ того же образца (1,6% деформация) на частоте 9,3 Гц

На рис. 1 показаны температурные зависимости концентрации и подвижности носителей для исходного и деформированного образцов. В образце с дислокациями концентрация носителей в валентной зоне зависит от температуры экспоненциально с энергией активации $E_0 = 0,44$ эв, причем при температурах ниже 100К она становится $< 10^8$ см^{-3} . На рис. 2 приведены температурные зависимости удельной проводимости для образца с дислокациями и для исходного образца, определенной как при постоянном токе так и на частоте 9,5 Гц . Как видно из рисунка, удельная проводимость деформированного образца на частоте 9,5 Гц более чем на семь порядков превышает удельную проводимость этого же образца по постоянному току, в то время как для исходного кристалла эти проводимости совпадают. Обращает на себя внимание тот факт, что в области температур $T < 100\text{К}$ СВЧ проводимость $\sigma(\omega)$ слабо зависит от температуры, но при $T = 30 \div 40\text{К}$ наблюдается довольно резкое умень-

шение величины $\sigma(\omega)$. При $T < 30\text{K}$ проводимость $\sigma(\omega)$ падает экспоненциально с энергией активации $E_{\omega} \lesssim 5\text{ мэВ}$.

На рис. 3 приведены зависимости $\sigma(\omega)$ на частотах 9,5 и 35 Гц для образца с дислокациями. Проводимость $\sigma(\omega)$ увеличивается с ростом частоты, кроме того заметно уменьшение E_{ω} с увеличением ω .

Следует подчеркнуть, что отмеченная выше область резкого уменьшения $\sigma(\omega)$ находится примерно в той же области температур ($30 \pm 40\text{K}$), где наблюдается минимум подвижности свободных носителей в деформированных образцах кремния с сильным легированием [4], а также имеет место отклонение от закона Кюри температурной зависимости магнитной восприимчивости дислокационной спиновой системы и аномальное поведение времен спиновой релаксации [3].

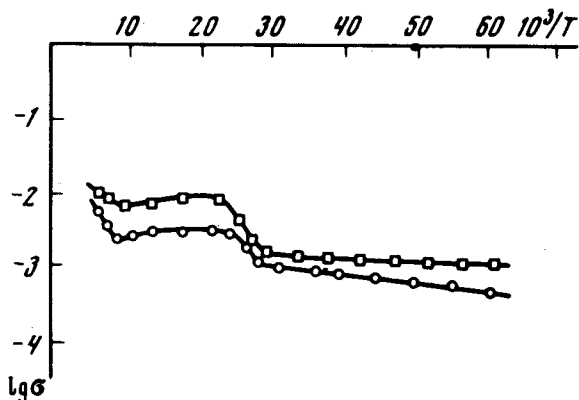


Рис. 3. Зависимость проводимости $\sigma(\omega)$ от температуры, образца с деформацией 1,9%: \circ — частота 9,3 Гц, \square — частота 33 Гц

Анализ полученных экспериментальных результатов показывает, что обнаруженная высокая СВЧ проводимость в деформированных кристаллах кремния связана с проводимостью вдоль ядер дислокаций. Вопрос о возникновении сопутствующих дефектов и выборе оптимального режима введения дислокаций нами был исследован ранее [3, 4, 6]. Здесь лишь укажем, что отжиг исследованных образцов при $T = 500^\circ\text{C}$ не приводит к существенному изменению параметров исследованных кристаллов, отсутствует также эффект старения образцов.

В дальнейшем мы предполагаем изучить обнаруженное явление более подробно.

Институт физики твердого тела
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
2 июля 1976 г.

Литература

- [1] Л.Н.Булаевский. УФН, 115, 263, 1975.
- [2] Г.Матаре. Электроника дефектов в полупроводниках, М., изд. Мир, 1974.
- [3] С.В.Броуде, В.А.Гражулис, В.В.Кведер, Ю.А.Осипьян. ЖЭТФ, 66, 1469, 1974.
- [4] В.А.Гражулис, В.А.Мухина, Ю.А.Осипьян, С.А.Шевченко. ЖЭТФ, 68, 149, 1975.
- [5] М.Мотт, Э.Дэвис. Электронные процессы в некристаллических веществах. М., изд. Мир, 1974 г.
- [6] В.А.Гражулис, Ю.А.Осипьян. ЖЭТФ, 58, 1259, 1970.
- [7] В.В.Кведер, Л.А.Прозорова. Письма в ЖЭТФ, 19, 683, 1974.