

ВЛИЯНИЕ СПИНОВОГО СОСТОЯНИЯ ДИСЛОКАЦИЙ НА ПРОВОДИМОСТЬ КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

В.А.Гражулис, В.В.Кведер, Ю.А.Осипьян

В работе обнаружен эффект уменьшения проводимости кристаллов кремния при насыщении сигнала ЭПР дислокаций. В области гелиевых температур величина эффекта пропорциональна $T^{-0,75}$. Обнаруженное явление связывается с зависимостью взаимодействия свободных носителей заряда с дислокациями от спинового состояния дислокаций и самих носителей.

Ранее нами наблюдался электронный спиновый резонанс на системе дислокаций, введенных пластической деформацией в чистый кремний, в котором до деформации отсутствовали в измеримой концентрации всякие парамагнитные центры [1]. В дальнейшем на температурной зависимости характеристик дислокационного сигнала ЭПР была обнаружена особенность в окрестности 50 К, наличие которой мы связывали, предположительно, с магнитным фазовым переходом в дислокационной спиновой системе [2]. В недавней работе [3], где изучалась температурная зависимость холловской подвижности носителей тока в кремнии с дислокациями в этом же температурном интервале наблюдался минимум подвижности. В свете предыдущих результатов этот минимум можно было связать с резким увеличением рассеяния на флуктуациях магнитного момента дислокационной спиновой системы в районе фазового перехода. В этой связи возник вопрос о том, возможно

ли прямым образом в эксперименте наблюдать вклад в рассеяние носителей тока, связанный с состоянием спиновой дислокационной системы. Подобная попытка была нами проделана и результаты приводятся в настоящем сообщении. Магнитное состояние дислокаций изменялось путем насыщения дислокационного сигнала ЭПР СВЧ полем [4-9]. Исследовались образцы кремния *p*-типа с размером $2 \times 2,5 \times 8 \text{ мм}^3$, деформированные при 700°C по методике, описанной в [1, 2]. Образцы имели концентрацию электрически активной примеси не более $10^{12} \div 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Исследуемый образец помещался на дно прямоугольного резонатора (H_{102}). Измерения проводились на частоте 9200 МГц в интервале $4,2 - 1,4 \text{ К}$. Внешнее поле H_0 прикладывалось перпендикулярно как СВЧ полю H_1 , так и постоянному току, протекающему через образец. Поскольку концентрация носителей тока при этих температурах мала (сопротивление $10^{12} \div 10^{13} \text{ ом}$), для создания некоторого количества носителей тока в образце использовалась слабая ИК подсветка.

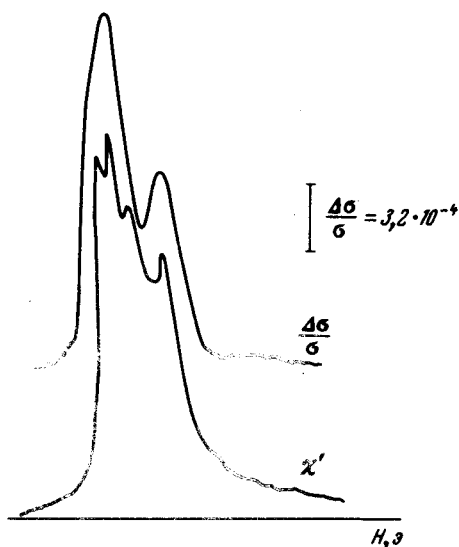


Рис. 1. Запись спектра $\Delta\sigma/\sigma$ и сигнала ЭПР (X') от дислокаций. Температура образца $\sim 10^{-9} \text{ ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. По оси абсцисс — магнитное поле. g — фактор $\sim 2,0$. Ширина линий $\sim 25 \text{ э}$

Для этого в резонатор помещалась миниатюрная лампочка накаливания, на которую подавалось напряжение, составляющее $5 \div 10\%$ от ее номинального напряжения питания. Излучение лампочки соответствовало излучению черного тела с максимумом на длинах волн $3 \div 4 \text{ мк}$. Перед лампочкой ставился фильтр в виде пластинки кремния толщиной $\sim 2 \text{ мм}$, который поглощал коротковолновую часть излучения. Удельное сопротивление образцов в используемом диапазоне подсветок и температур менялось в диапазоне $2 \cdot 10^8 \div 10^{10} \text{ ом} \cdot \text{см}$, концентрация носителей не превышала 10^8 см^{-3} . Через образец пропускался ток $10^{-9} \div 10^{-10} \text{ а}$. Напряжение на потенциальных контактах и ток через образец измерялись электрометром с входным сопротивлением 10^{14} ом . Измерения проводились следующим образом: магнитное поле разворачивалось медленно в диапазоне $3060 \div 3260 \text{ э}$. При каждом значении поля (шаг $0,2 \text{ э}$) замерялась проводимость образца при включенной и выключенной СВЧ мощности и находилась разность этих величин $\Delta\sigma$. После чего строилась зависимость величины $\Delta\sigma/\sigma$ от значений "статического"

магнитного поля. Процедура измерения была полностью автоматизирована путем подключения электрометра к ЭВМ. Такая методика позволяла преодолеть трудности, связанные с выделением $\Delta\sigma/\sigma$ на фоне сильного магнетосопротивления образца, а также с дрейфами, и улучшить отношение сигнал/шум за счет машинного усреднения большого числа измерений. Основным результатом, который мы сообщаем в настоящей работе состоит в том, что при переходе дислокационной спиновой системы через резонанс наблюдается отчетливый рост электрического сопротивления, причем форма изменения $\Delta\sigma/\sigma$ при развертке магнитного поля совпадает с формой линии дислокационного сигнала ЭПР.

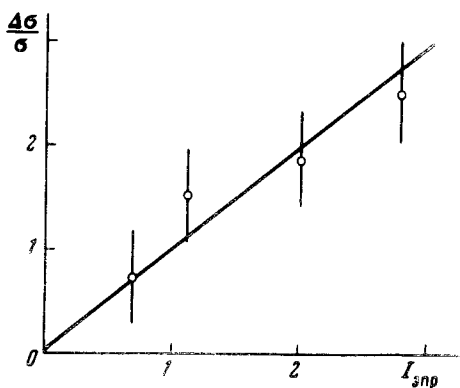


Рис. 2. Зависимость сигнала $\Delta\sigma/\sigma$ в условных единицах от плотности дислокаций. $T = 1,4\text{K}$

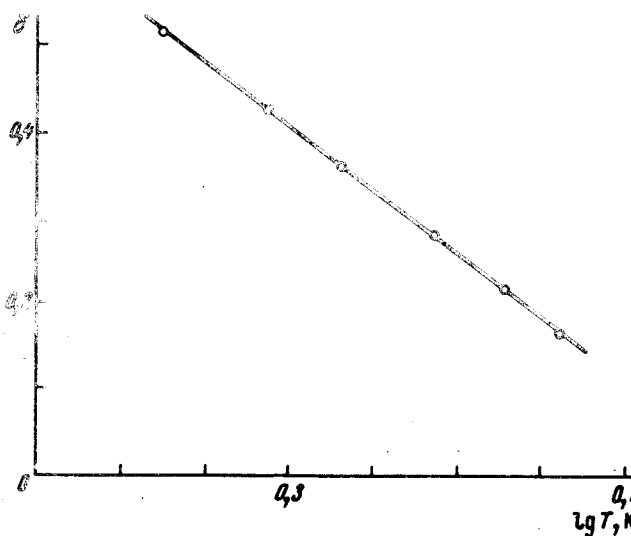


Рис. 3. Зависимость величины $\delta = \lg(\Delta\sigma/\sigma) + 3$ от $\lg T, \text{K}$. Наклон кривой соответствует $\Delta\sigma/\sigma \sim T^{-0,75}$

Эти данные представлены на рис. 1. Спектр $\Delta\sigma/\sigma$ уширен по сравнению со спектром ЭПР (χ'), так как он записан при СВЧ мощности, соответствующей насыщению спиновой системы. На рис. 2 приведена зависимость величины $\Delta\sigma/\sigma$ от интенсивности сигнала ЭПР для четырех образцов с разной концентрацией дислокационных спинов. На рис. 3 приведена зависимость величины эффекта от температуры. Оказалось, что в области $1,4 \div 4,2 \text{ K}$ для дислокаций $\Delta\sigma/\sigma \sim T^{-0,75}$. В случае взаимодействия носителей с парамагнитными центрами можно ожидать $\Delta\sigma/\sigma \sim T^{-2}$, так как в сечение взаимодействия будет входить произведение спиновых поляризацій для центров и для носителей тока [9]. Таким об-

разом, слабая зависимость $\Delta\sigma/\sigma(T)$ в случае дислокаций может быть связана с упорядочением спинов на дислокациях. Мы предполагаем этот вопрос в дальнейшем изучить более подробно.

В заключение отметим, что нагрев носителей тока СВЧ мощностью (при мощностях не превышающих 10^{-2} вт) пренебрежимо мал и кроме того этот нагрев приводит к увеличению проводимости образцов, тогда как при прохождении через дислокационный резонанс наблюдается уменьшение проводимости.

Институт физики твердого тела
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
11 мая 1975 г.

Литература

- [1] В.А.Гражулис, Ю.А.Осипьян. ЖЭТФ, **60**, 1150, 1971.
 - [2] С.В.Броуде, В.А.Гражулис, В.В.Кведер, Ю.А.Осипьян. ЖЭТФ, **66**, 1469, 1974.
 - [3] В.А.Гражулис, В.Ю.Мухина, Ю.А.Осипьян. ЖЭТФ, **68**, вып. 6, 1975.
 - [4] R.Maxwell, A.Honig. Phys. Rev. Lett., **17**, 188, 1966.
 - [5] G.Lampel. Phys. Rev. Lett., **20**, 491, 1968.
 - [6] L.Lepine. Phys. Rev., **B6**, 436, 1972.
 - [7] K.Morigaki, M. Onda. J. of Phys. Soc. Japan, **36**, 1049, 1974.
 - [8] A.Honig. Phys. Rev. Lett., **17**, 186, 1966.
 - [9] G.Toth. Ph. D Thesis Universite de Paris, 1972.
-