

## ФЕРРОМАГНЕТИЗМ КРЕМНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННЫЙ РАДИАЦИОННЫМИ ДЕФЕКТАМИ

А.Ф.Хохлов, П.В.Павлов

Установлено наличие ферромагнитного упорядочения в кремнии с высокой концентрацией радиационных дефектов.

Хорошо известно, что при определенных дозах облучения кремния ионами средних энергий наблюдается переход его в аморфное состояние. При этом в спектре ЭПР появляется изотропная линия с  $g$ -фактором 2,0055 [1, 2]. Парамагнитные радиационные дефекты, ответственные за указанный спектр ЭПР, получили название  $VV$ -центров [2]. Такие же дефекты наблюдаются и в аморфном кремнии, полученном напылением. При этом концентрация их составляет  $N_{VV} = 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  [3]. До недавнего времени считалось, что в кремнии, аморфизованном ионной бомбардировкой, максимально достижимая концентрация  $VV$ -центров также составляет  $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Однако в [4] было обнаружено, что при облучении кремния ионами неона с дозами, значительно превышающими дозу аморфизации, в тонком ( $\sim 100 \text{ \AA}$ ) приповерхностном слое  $N_{VV}$  достигает значения  $10^{21} \text{ см}^{-3}$ . Увеличение  $N_{VV}$  при сверхбольших дозах сопровождается уширением линии ЭПР, которое объясняется возникновением обменного взаимодействия между  $VV$ -центрами [4]. Таким образом, есть основание полагать, что при низких температурах в слоях кремния с повышенной концентрацией парамагнитных  $VV$ -центров возможно магнитное упорядочение, приводящее к ферро- или антиферромагнетизму. При этом в данном случае роль неспаренного электрона  $d$ - или  $f$ -оболочки магнитных атомов должен играть неспаренный электрон, связанный с  $VV$ -центром.

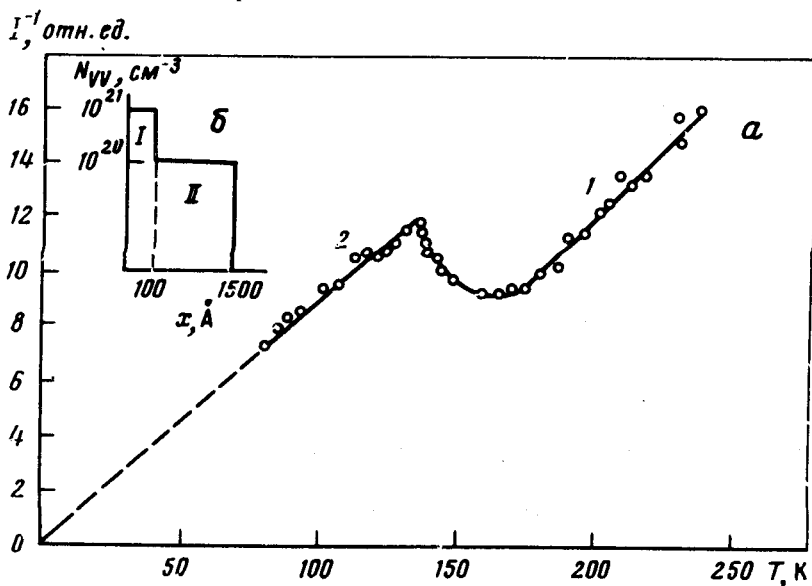
Мы исследовали температурную зависимость ЭПР в кремнии, облученном ионами  $\text{Ne}^+$  и  $\text{Ar}^+$  с дозами  $2 \div 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ . Энергия ионов составляла 50 кэВ. Запись спектра производилась на частоте 9 Гц при плавном изменении температуры от 77 до 300 К и пилообразной развертке магнитного поля.

На рисунке приведена температурная зависимость обратной интенсивности ( $I^{-1}$ ) ЭПР для образца, облученного ионами  $\text{Ne}^+$  с дозой  $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ . Там же схематически показано распределение  $VV$ -центров.

Видно, что высокотемпературный участок 1 зависимости  $I^{-1}(T)$  описывается законом Кюри – Вейсса, тогда как на участке 2 выполняется закон Кюри. Заметим, что аналогичная зависимость  $I^{-1}(T)$  имеет место и при облучении кремния ионами  $\text{Ar}^+$ . Скачок интенсивности при  $T \approx 146 \text{ К}$  связан, по нашему мнению, со следующим.

В области температур выше 140 К вклад в ЭПР вносят оба дефектных слоя I и II (рис. б). Наличие обменного взаимодействия в слое I приводит к тому, что  $I^{-1}(T)$  подчиняется закону Кюри – Вейсса. При  $T \approx 140 \text{ К}$  в слое I с высокой концентрацией  $VV$ -центров происходит

магнитное упорядочение, и он перестает участвовать в ЭПР. Интенсивность сигнала уменьшается. На участке 2 кривой  $I^{-1}(T)$  интенсивность ЭПР определяется только слоем II, где упорядочения нет из-за низкой концентрации парамагнитных центров. Поэтому зависимость  $I^{-1}(T)$  подчиняется закону Кюри.



Зависимость обратной интенсивности ЭПР от температуры в кремнии, облученном ионами  $\text{Ne}^+$  с энергией 50 кэв и дозой  $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  (а) и схематическое изображение профиля дефектов в этом образце (б)

Чтобы окончательно убедиться в справедливости приведенных рассуждений, мы выполнили следующий эксперимент. С облученного образца кремния, для которого зависимость  $I^{-1}(T)$  аналогична приведенной на рисунке, был удален слой I. После этого снова были произведены измерения температурной зависимости ЭПР. Снятие слоя с повышенной концентрацией дефектов привело к исчезновению скачка на кривой  $I^{-1}(T)$ , и она хорошо описывалась законом Кюри.

Приведенные данные позволяют заключить, что обнаружен ферромагнетизм кремния, обусловленный радиационными дефектами. Парамагнитная температура Кюри  $\Theta$  достигает 140 К. Анализ имеющихся в нашем распоряжении данных позволяет также констатировать, что  $\Theta$  изменяется с изменением степени дефектности слоя, определяемой дозой облучения.

Вопрос о механизме обменного взаимодействия в данном случае требует своего решения.

Авторы выражают благодарность Е.С.Демидову, Е.И.Зорину и В.И.Пашкову за полезное обсуждение и А.И.Машину – за помощь в измерениях.

Горьковский исследовательский  
физико-технический институт  
Горьковского  
государственного университета  
им. Н.И.Лобачевского

Поступила в редакцию  
22 июля 1976 г.

## Литература

- [ 1 ] В.Л. Crowder, R.S. Title, М.Н. Brodsky, G.D. Pettit. Appl. Phys. Lett., 16, 205, 1970.
  - [ 2 ] Н.Н. Герасименко, А.В. Двуреченский, Л.С. Смирнов. ФТП. 5, 1700, 1971.
  - [ 3 ] М.Н. Brodsky, R.S. Title. Phys. Rev. Lett., 23, 581, 1968.
  - [ 4 ] А.Ф. Хохлов, А.А. Ежевский, Е.С. Демидов, П.В. Павлов, Е.И. Зорин. Взаимодействие атомных частиц с твердым телом. Часть 2, Харьков, 1976, стр. 22.
-