

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ $6H\text{-SiC} < N >$ НА ИЗОЛЯТОРНОЙ СТОРОНЕ ПЕРЕХОДА МЕТАЛЛ – ДИЭЛЕКТРИК

*М.В.Алексеевко, А.И.Вейнгер, А.Г.Забродский
В.А.Ильин, Ю.М.Тауров, В.Ф.Цветков*

На изоляторной стороне перехода металл – диэлектрик (ПМД) в $6H\text{-SiC} < N >$ определен характер низкотемпературной проводимости и методом ЭПР исследованы магнитные свойства системы. Аномально далеко от перехода обнаружено уменьшение спинового поглощения и характерное изменение механизма спиновой релаксации.

1. Имеющийся экспериментальный материал в области исследования ПМД в легированных полупроводниковых материалах накоплен, в основном, на моноатомных полупроводниках Si и Ge с мелкими примесями. При этом критическое для перехода значение варьируемого параметра (концентрации основной примеси N , степени компенсации, давления, магнитного поля) фиксировалось по характерным особенностям низкотемпературных электрических свойств у диэлектрической ^{1, 2} или металлической ³ стороны перехода. Как показали недавние измерения при сверхнизких температурах ³⁻⁶, свойства эти в окрестности ПМД меняются непрерывно, аналогично фазовым переходам второго рода и могут быть описаны скейлинговой теорией ПМД. Информация о магнитных свойствах в области ПМД более скудна и почти целиком получена на системе $\text{Si} < P >$ ⁷⁻⁹. Здесь на диэлектрической стороне перехода примеси дают парамагнитный вклад в восприимчивость в соответствии с законом Кюри: $\chi \sim N/T$. По мере приближения к переходу концентрационная и температурная зависимости χ ослабевают. В результате восприимчивость, как функция концентрации достигает максимума вблизи критической для перехода концентрации N_c со стороны диэлектрика. Ширина линии ЭПР доноров в Si ¹⁰, Ge и InSb ¹¹ имеет характерный минимум на переходе. Это связывается со сменой механизма спиновой релаксации при ПМД, предположительно из-за включения в канал релаксации при $N \gtrsim N_c$ взаимодействия со свободными носителями (типа так называемого „s-d-взаимодействия”) ⁷.

Мы сообщаем новые данные об особенностях некоторых электрических и магнитных свойств при ПМД в системе со значительно более глубокими примесями — политипной модификации 6H карбида кремния, легированного донорной примесью азота с энергией ионизации $\sim 0,1$ эВ.

2. Серия образцов для измерения проводимости, эффекта Холла и ЭПР готовилась из пластин 6H-SiC с базовой плоскостью (0001), легированных азотом в процессе роста по методике, описанной в ¹² и специально не компенсированных. Диапазон изменения концентрации азота: $N = (0,1 / \div 5,4) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Магнитные свойства образцов исследовались с помощью ЭПР в X-диапазоне на спектрометре Е-112 „Вариант“. Необходимые для расчета концентрации спинов N_s и восприимчивости χ площади под кривыми поглощения определялись в процессе записи спектров образца и эталона концентрации двойным интегрированием сигнала $d\chi''/dH$ с помощью ЭВМ, сопряженной со спектрометром. Скин-эффект отсутствовал.

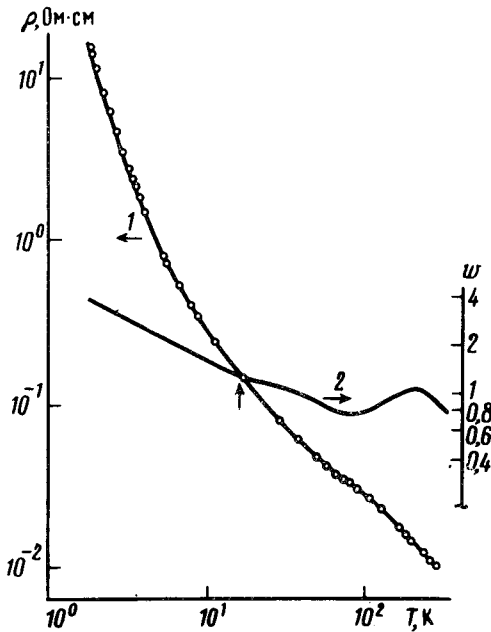


Рис.1. Удельное сопротивление (1) и приведенная энергия активации (2) образца с $N = 3,4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$

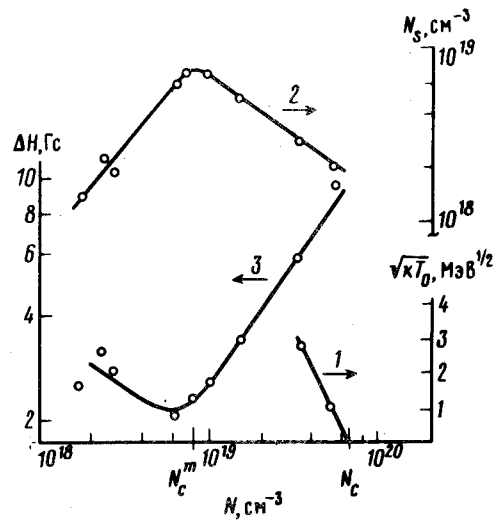


Рис.2. Параметр $\sqrt{kT_0}$ (1), концентрация спинов (2) и ширина линии ЭПР (3) на диэлектрической стороне ПМД

3. На рис.1 приведена типичная температурная зависимость удельного сопротивления $\rho(T)$ одного из образцов с концентрацией доноров, вдвое меньшей N_c . Анализ путем исследования приведенной энергии активации $w = -d \lg \rho / d \lg T$ (метод подробно изложен в ^{2,6}) показал, что при достаточно низких температурах $T \leq T_0$ (отмечено стрелкой на рис.1) $w \sim T^{-x}$ и

$$\rho(T) = \rho_0 \exp(T_0/T)^x, \quad (1)$$

где ρ_0 , T_0 — постоянные, $x \cong 0,5$.

Закон (1) характерен для прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка в области кулоновской квазищели вида $g(E) = g_0(E - E_F)^2$ в плотности локализованных состояний $g(E)$ в окрестности уровня Ферми E_F ¹³. В области слабой локализации экспоненциальный закон (1) при температурах $T \gg T_0$ трансформируется в степенной:

$$\rho(T) \sim T^{-m}, \quad (2)$$

где $0 < m < 1$.

Подобный переход от (1) к (2) изучался на системе $\text{Ge} < \text{As} >$ в ^{5,6}, где он связывался с тепловым „замытием” кулоновской щели. Как и там, в нашем случае параметры m , ρ_0 , T_0 и T_v уменьшаются с приближением к ПМД, что обусловлено „схлопыванием” щели на переходе. Критическая для ПМД концентрация доноров N_c находилась из условия обращения в нуль низкотемпературной энергии активации ^{2,5,6}: $\lim T_0(N) = 0$. Процедура определения N_c иллюстрируется на рис.2. Как следует из него, $N_c = 6,6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, что хорошо согласуется с критерием Мотта для ПМД ¹: $N_c^{1/3} a \cong 0,25$, где борковский радиус $a = 5 \div 7 \text{ \AA}$ ^{14,15}.

4. На рис.2 приведена также зависимость концентрации спинов N_s от уровня легирования, измеренная с помощью ЭПР-поглощения. Видно, что $N_s \cong N$ вплоть до значений $N \cong N_c^m \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$. При $N \gg N_c^m$ наблюдается уменьшение концентрации спинов, ответственных за ЭПР-поглощение. Так, в области ПМД только $\leq 3\%$ примесных электронов имеют магнитный момент. Отметим, что, в отличие от $\text{Si} < \text{P} >$, в $6H\text{-SiC} < \text{N} >$ на всей диэлектрической стороне ПМД температурная зависимость восприимчивости $\chi \sim \int \chi'' dH$ удовлетворительно описывается законом Кюри и поведение $\chi(N)$ аналогично $N_s(N)$. По существующей точке зрения исчезновение спинов на диэлектрической стороне ПМД есть результат образования обменно-связанных пар и комплексов, основным состоянием которых является спиновый синглет. Характерной для обменного связывания в $6H\text{-SiC} < \text{N} >$ является концентрация N_c^m . Заметим, что по нашим электрическим измерениям она соответствует области перехода от сильной локализации к слабой.

Концентрационная зависимость ширины линии $\Delta H(N)$ коррелирует с $N_s(N)$: с увеличением уровня легирования в области сильной локализации ($N \lesssim N_c^m$) линия слегка сужается, а в области слабой локализации ($N \gg N_c^m$) начинает уширяться (рис. 2), что отражает процесс ускорения релаксации спиновой системы. Известное объяснение подобного ускорения вблизи ПМД за счет обмена со свободными носителями в нашем случае едва ли возможно по той причине, что в $6H\text{-SiC} < \text{N} >$ концентрация N_c^m сдвинута почти на порядок величины в диэлектрическую сторону и в области гелиевых температур доля свободных носителей настолько мала, что они не могут быть ответственны за спиновую релаксацию локализованных электронов. Поэтому мы заключаем, что а) в $6H\text{-SiC} < \text{N} >$ при $N > N_c^m$ скорость спиновой релаксации и обмен быстро возрастают из-за ослабления локализации электронных состояний примесной зоны; б) аномальный сдвиг N_c^m в сторону диэлектрика обусловлен тем, что здесь, в отличие от полупроводников с мелкими примесями, слабо локализованные состояния возникают на гораздо более значительном удалении от перехода, т.е. при существенно меньших отношениях N/N_c .

Авторы благодарны А.Г.Аронову за весьма полезное обсуждение затронутых вопросов.

Литература

1. Мотт Н. Переходы металл – изолятор. М.: Мир, 1979.
2. Забродский А.Г. ФТП, 1980, 14, 1492.
3. Rosenbaum T.F., Andres K., Thomas G.A., Bhatt R.N. Phys. Rev. Lett., 1980, 45, 1723.
4. Hess H.F., De Conde K., Rosenbaum T.F., Thomas G.A. Phys. Rev., 1982, B25, 5578.
5. Забродский А.Г., Зиновьева К.Н. Письма в ЖЭТФ, 1983, 37, 369.
6. Забродский А.Г., Зиновьева К.Н. ЖЭТФ, 1984, 86, 727.
7. Ve H., Maekawa S. Phys. Rev., 1971, B3, 4232.
8. Quirt J.D., Marko J.R. Phys. Rev., 1973, E7, 3842.
9. Andres K., Bhatt R.H., Goalwin P., Rice T.M., Walstedt R.E. Phys. Rev., 1981, B24, 244.
10. Maekawa S., Kinoshita N. Journ. of the Phys. Soc. of Japan, 1965, 20, 1447.
11. Gershenson E.M., Pevin N.M., Fogelson M.S. Phys. Stat. Sol., 1970, 38, 865.

12. *Вайнер В.С., Ильин В.А., Левин В.И., Райхель Ф., Таиров Ю.М., Цветков В.Ф.* Кн. : 5 Всесоюзн. конф. по физико-химическим основам легирования полупроводниковых материалов. М., 1982, 132.
13. *Шкловский Б.И., Эфрос А.Л.* Электронные свойства легированных полупроводников. М.: Наука, 1979.
14. *Вейнгер А.И.* ФТП, 1969, 3, 70.
15. *Дейген М.Ф., Зарицкий И.М., Шульман Л.А.* ФТТ, 1970, 12, 2902.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
24 января 1984 г.