

ПАРАМАГНЕТИЗМ КРИСТАЛЛОВ *p*-Si, ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ КОБАЛЬТА

Н.А. Поклонский, А.О. Коробко, Н.М. Лапчук
Белорусский государственный университет,
220050, пр. Ф. Скорины 4, г. Минск, Республика Беларусь

Введение

Имплантация кремния ионами кобальта, никеля и железа используется для создания магнитных нанокластеров и силицидов металлов [1–4]. Композиционные материалы на основе магнитных нанокластеров находят применение при разработке новых элементов хранения информации [5]. Силициды металлов используются также в качестве материалов для контактов и межсоединений элементов интегральных микросхем.

Наряду с имплантацией ионов металлов, которая приводит к созданию силицидов металлов, проводится и имплантация малыми флюенсами ионов с целью изучения процессов, происходящих при ранней стадии мезотаксии. При этом из-за того, что процессы коалесценции атомных дефектов и перколяции спинов еще не происходят [1], становится возможным исследование структурных изменений в кремнии, например, таких как формирование преципитатов CoSi_2 и отжиг радиационных дефектов.

В данной работе проводилась имплантация кристаллов кремния *p*-типа при комнатной температуре ионами кобальта с энергией 380 keV и методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) исследовались их парамагнитные свойства.

Методика эксперимента

Исследовались пластины монокристаллического *p*-кремния (удельное сопротивление 3 к Ω ·см, ориентация поверхности (100)) толщиной 300 μm , в которые имплантировали ионы кобальта с энергией 380 keV (флюенсы 10^{14} , $3 \cdot 10^{14}$, 10^{15} , $3 \cdot 10^{15}$, 10^{16} cm^{-2}). Имплантация кремния ионами Co^+ проводилась при комнатной температуре в стационарном режиме на ускорителе ROMEО (университет им. Ф. Шиллера, Германия). Угол имплантации равнялся 7° (для исключения каналирования ионов), плотность ионного тока — 0.12–0.2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Измерения ЭПР выполнялись на спектрометре “RadioPAN SE/X 2543”, работающем в *X*-диапазоне (резонатор H_{102}) при частоте модуляции поляризующего магнитного поля 100 kHz; чувствительность спектрометра — $5 \cdot 10^{12}$ spin/mT. Для контроля добротности резонатора, настройки фазы модуляции магнитного поля и калибровки H_1 -компоненты СВЧ-излучения использовался кристалл рубина ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$), размещенный на стенке резонатора. Исследуемые образцы кремния помещались в центр H_{102} -резонатора.

Результаты и обсуждение

При температуре $T = 300$ К в исследованных образцах регистрировался только ЭПР-сигнал малой интенсивности с *g*-фактором 2.0057 и шириной $\delta B = 0.74$ мТ. Для качественной интерпретации полученных результатов можно провести аналогию с работой [6], где приводятся измерения ЭПР кремния, имплантированного ионами железа (100 keV) с разными флюенсами. Сигнал ЭПР при комнатной температуре, обусловленный кластерами железа или уединенными парамагнитными ионами железа, при имплантации флюенсами меньше 10^{17} cm^{-2} , может не наблюдаться в связи с незначительной концентрацией таких центров, а также с ориентационным усреднением сигналов отдельных ионов в аморфном материале [6]. Скорее всего, этот же механизм действителен и для имплантации ионов кобальта в *p*-Si.

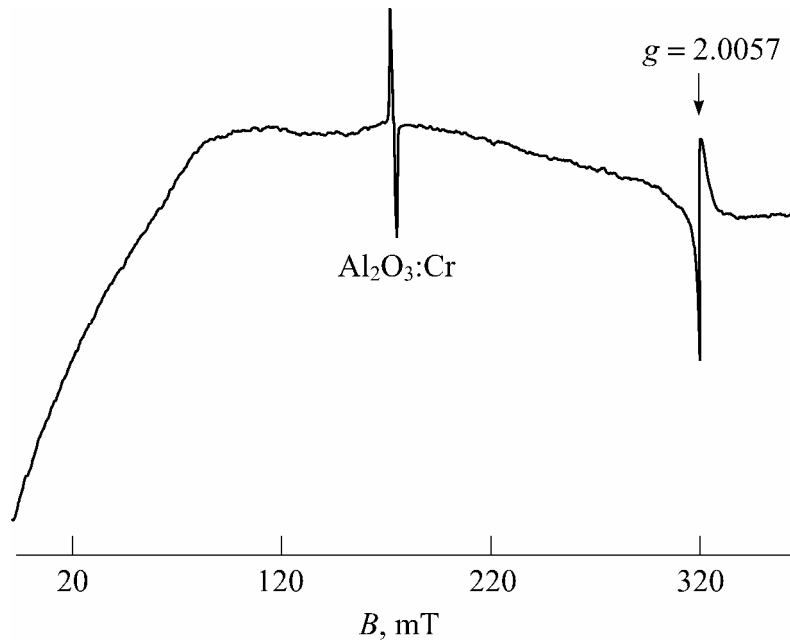


Рис. 1. Спектр ЭПР кремния, имплантированного ионами кобальта флюенсом $3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$. (На квазирезонансной линии поглощения заметен сигнал рубина и резонансный сигнал ($g = 2.0057$) оборванных химических связей атомов Si. Измерения при температуре $T = 78 \text{ K}$, индукция поляризирующего магнитного поля B перпендикулярна плоскости имплантированного слоя)

При температуре $T = 78 \text{ K}$ регистрировался (см. рис. 1) интенсивный ЭПР-сигнал аморфного кремния ($g = 2.0057$, $\delta B = 0.74 \text{ mT}$), обусловленный оборванными Si–Si связями, возникшими в результате имплантации Co^+ . Амплитуда сигнала при 78 K в четыре раза больше, чем при 300 K . Согласно литературным данным (см., например, [7, 8]), g -фактор, соответствующий аморфному кремнию, равен 2.0055 . Следовательно, полученный результат может означать влияние кобальта на парамагнитные центры аморфных областей, увеличивающее g -фактор. Отметим, что сигнал ЭПР от областей аморфного кремния в p -Si регистрировался при температуре жидкого азота на фоне квазирезонансной линии шириной порядка 170 mT . Это проявляет магнитное упорядочение, обусловленное атомами кобальта и собственными дефектами кремния (см. рис. 1).

При записи спектра ЭПР для всех флюенсов имплантации ионами кобальта кремния при $T = 78 \text{ K}$ наблюдается магнитный гистерезис. (При многократной записи прямой и обратной развертки внешнего магнитного поля и последовательного поворота образца резонансный сигнал на рис. 1 не возвращается к своему начальному положению после суммарного поворота образца в H_{102} -резонаторе на угол 360° .)

В спектре ЭПР регистрируется интенсивная линия с g -фактором, близким к g -фактору аморфного кремния, что говорит о наличии аморфных областей после имплантации флюенсом $3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ (порог аморфизации). Однако изучение зависимости интенсивности сигнала от мощности СВЧ-излучения $P \propto H_1^2$ для флюенсов $3 \cdot 10^{14}$, 10^{15} , $3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ показывает (рис. 2), что либо существуют центры с различными временами парамагнитной релаксации, которые насыщаются по-разному, либо времена релаксации зависят от числа парамагнитных центров и равномерности их распределения в имплантированном слое [8]. Так, для образцов, имплантированных флюенсами 10^{15} cm^{-2} и $3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, зависимость амплитуды сигнала ЭПР от напряженности магнитной компоненты СВЧ-поля H_1 в резонаторе близка к линейной, что характерно для парамагнитных центров аморфных областей (рис. 2, кривые 2 и 3).

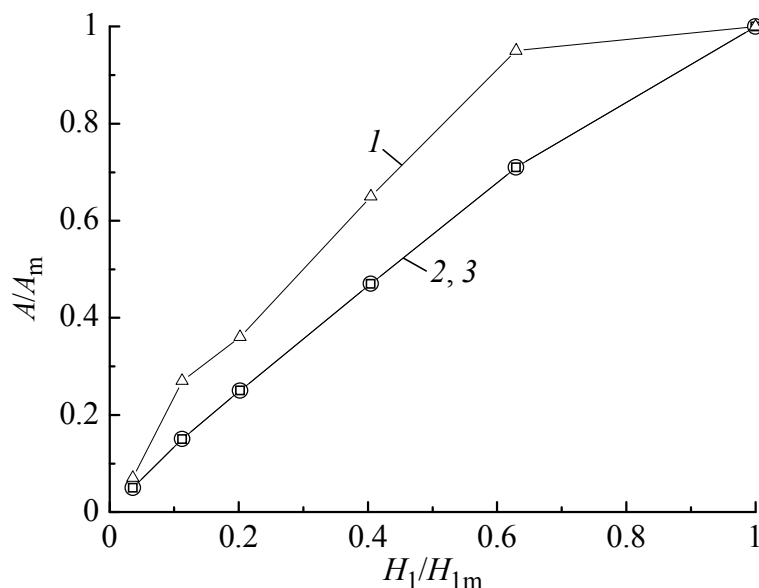


Рис. 2. Зависимость амплитуды A сигнала ЭПР областей аморфного кремния при $T = 78$ К от мощности СВЧ-излучения для образцов p -Si, имплантированных ионами кобальта флюенсами: 1 — $3 \cdot 10^{14}$, 2 — 10^{15} , 3 — $3 \cdot 10^{15}$ cm^{-2} (H_{1m} соответствует мощности $P = 70$ мВт)

Заключение

1. При температуре $T = 78$ К в кристаллах p -Si, имплантированных ионами кобальта, зарегистрирована квазирезонансная линия ЭПР шириной порядка 170 мТ. На ней обнаружен резонансный сигнал ($g = 2.0057$, $\delta B = 0.74$ мТ) парамагнитных центров аморфных областей кремния. Обнаружен также магнитный гистерезис квазирезонансной линии ЭПР кристалла кремния, имплантированного кобальтом. (Квазирезонансная линия от атомов Со и собственных дефектов кремния при $T = 300$ К не наблюдается.)

2. Из зависимостей амплитуды сигнала ЭПР ($g = 2.0057$, $\delta B = 0.74$ мТ) парамагнитных центров аморфных областей от мощности СВЧ-излучения получена оценка флюенса ($3 \cdot 10^{14}$ cm^{-2}) ионов кобальта с энергией 380 keV достаточного для аморфизации кремния при комнатной температуре.

Список литературы

1. A.P. Knights, G.R. Carlow, M. Zinke-Allmang, P.J. Simpson. Phys. Rev. B. **54**, 19, 13955 (1996).
2. Z. Tan, F. Namavar, J.I. Budnick, F.H. Sanchez, A. Fasihuddin, S.M. Heald, C.E. Bouldin, J.C. Woicik. Phys. Rev. B. **46**, 7, 4077 (1992).
3. Z. Tan, J.I. Budnick, F.H. Sanchez, G. Tourillon, F. Namavar, H.C. Hayden. Phys. Rev. B. **40**, 9, 6368 (1989).
4. A.E. White, K.T. Short, R.C. Dynes, J.P. Garno, J.M. Gibson. Appl. Phys. Lett. **50**, 2, 95 (1987).
5. Q. Peng, S.P. Wong, I.H. Wilson, N. Wang, K.K. Fung. Thin Solid Films **270**, 573 (1995).
6. В.Б. Гусева, А.Ф. Зацепин, В.А. Важенин, В. Schmidt, Н.И. Гаврилов, С.О. Чолах. ФТТ **47**, 4, 650 (2005).
7. М.В. Власова, Н.Г. Каказей, А.М. Калиниченко, А.С. Литовченко. Радиоспектроскопические свойства неорганических материалов. Справочник. Наукова думка, Киев (1987).
8. С.И. Рембеза. Парамагнитный резонанс в полупроводниках. Metallurgia, М. (1988).