

03.05.07

Влияние режима пластической деформации на магнитные свойства монокристаллов кремния Cz-Si

© А.И. Дмитриев¹, А.А. Скворцов², О.В. Коплак³, Р.Б. Моргун¹, И.И. Проскуряков⁴¹ Институт проблем химической физики РАН,
Черноголовка, Московская обл., Россия² Московский государственный технический университет „Московский автомеханический институт“,
Москва, Россия³ Учебно-научный центр „Физико-химическое материаловедение“
Киевского национального университета им. Т. Шевченко и НАН Украины,
Киев, Украина⁴ Институт фундаментальных проблем биологии РАН,
Пушино, Московская обл., Россия

E-mail: aid@icp.ac.ru

(Поступила в Редакцию 12 января 2011 г.)

Обнаружено изменение спектров электронного парамагнитного резонанса в монокристаллах кремния Cz-Si, пластически деформированных изгибом и кручением. Пластическая деформация пластин кремния, сопровождающаяся введением дислокаций $\sim 10^7 \text{ cm}^{-2}$, приводит к появлению новых линий в спектре электронного парамагнитного резонанса. Парамагнитные центры, вводимые при изгибе и кручении, и их спектры электронного парамагнитного резонанса отличаются от центров, исследованных ранее в условиях одноосной деформации. Пластическая деформация приводит к значительному увеличению диамагнитной составляющей магнитной восприимчивости, которое превышает рост парамагнитной составляющей в кристаллах Cz-Si.

Работа частично поддержана ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.“ (контракт № П2161), грантами РФФИ № 10-03-00314а, 09-08-97011-р_поволжье_а, грантом президента РФ МК-1764.2011.3.

1. Введение

Влияние магнитного поля $\sim 10 \text{ kOe}$ на пластичность кремния Cz-Si, выращенного методом Чохральского, было обнаружено в [1]. В дальнейшем о влиянии постоянного магнитного поля на различные характеристики пластичности кремния сообщали во многих работах. В частности, сообщалось о влиянии магнитного поля на пробег дислокаций [2], стартовые напряжения [3–5] и другие характеристики [6]. В [7] было впервые установлено, что в постоянном и микроволновом магнитных полях, удовлетворяющих условиям парамагнитного резонанса, наблюдается уменьшение подвижности дислокаций в Cz-Si. В дальнейшем выводы работы [7] были независимо подтверждены при исследовании стартовых напряжений дислокаций [8]. Полученные результаты свидетельствуют о спин-зависимых реакциях между дефектами структуры.

Упомянутые выше эксперименты поставили множество вопросов о природе парамагнитных частиц, участвующих в спин-зависимых реакциях и управляющих подвижностью дислокаций в кристаллах кремния в магнитном поле. Поэтому важно знать, какие парамагнитные дефекты-предшественники присутствуют в деформированных кристаллах перед их экспозицией в магнитном поле. К настоящему времени всеми группами исследователей независимо показано, что в кристаллах кремния, выращенных методом зонной плавки, магнитоласти-

ческий эффект не наблюдается [1–8]. Это дает основания предполагать, что атомы кислорода могут быть компонентой магниточувствительных кластеров, внутри которых магнитное поле управляет спин-зависимым процессом взаимодействия частиц.

Еще одной общей чертой всех экспериментов по магнитопластичности кремния является то, что выдержка кристаллов в магнитном поле всегда осуществляется после механического воздействия на кристаллы (царапание, высокотемпературный изгиб и т.п.). Помещение кристаллов в магнитное поле до механических воздействий не приводит к изменению подвижности дислокаций в них [1–8]. Следовательно, парамагнитные дефекты, введенные при механическом воздействии, участвуют в спин-зависимых процессах, которыми обусловлены магнитопластические эффекты в кристаллах кремния.

Фундаментальной базой для обсуждения парамагнитных дефектов, введенных в кристаллы при пластической деформации, являются работы [9–17], результаты которых обобщены в монографии [18]. Физические представления о механизмах зарождения парамагнитных дефектов в кристаллах кремния, а также об их свойствах были сформулированы для образцов, деформированных в условиях одноосного сжатия. Этот тип деформации приводит к образованию в кремнии парамагнитных центров трех типов: 1) точечные деформационные дефекты; 2) линейные дефекты типа оборванных связей вдоль дислокаций (расщепленные винтовые и шестидесяти-

градусные дислокации); 3) области аморфизированного кремния. При плотностях дислокаций $\sim 10^7\text{--}10^9\text{ см}^{-2}$ в пластически деформированном кремнии (одноосное сжатие 2–6% при температурах $T = 923\text{--}1168\text{ К}$) наблюдался сигнал электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), интенсивность которого пропорциональна плотности дислокаций [9,12]. Сигнал ЭПР в этих условиях не зависит от сорта примесей (бор, фосфор) и технологии выращивания кристаллов и состоит из набора перекрывающихся анизотропных линий шириной 2–15 Ое с эффективными g -факторами вблизи $g \approx 2.0$ [9,12].

При исследовании магнитопластического эффекта используются более сложные виды деформации кристаллов. Например, в работах [2–5] кристаллы подвергаются изгибу, а в [2,7] нанесение царапин на поверхность кремния дает различные компоненты напряжений сжатия, кручения и изгиба. Можно предполагать, что при таком широком спектре механических воздействий могут зарождаться самые разнообразные парамагнитные дефекты, тип которых может зависеть от режима пластической деформации кристаллов. Цель настоящей работы заключалась в установлении влияния режима пластической деформации (кручение и изгиб) на спектры ЭПР деформационных дефектов в кристаллах Cz-Si, а также в исследовании температурной зависимости магнитной восприимчивости этих центров.

2. Методика

Материалом для исследования служили стандартные односторонние полированные пластины монокристаллического кремния, вырезанные из монокристаллического слитка диаметром 100 мм, выращенного по методу Чохральского с удельным сопротивлением $1\ \Omega \cdot \text{см}$ (концентрация бора $\approx 1.5 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$), с кристаллографической ориентацией [100]. Введение дислокаций осуществлялось посредством пластической деформации пластины кручением или изгибом (рис. 1) при температуре $T = 1323\text{ К}$ в течение $t = 15\text{ мин}$.

Вырезанные пластины кремния p -типа размером $10 \times 30 \times 0.5\text{ мм}$ размещались между кварцевыми зажимами, которые в свою очередь помещались в кварцевую трубку диаметром 15 мм. Один зажим был неподвижен (для фиксации образца), а другой был изготовлен на основе кварцевого штока диаметром 14 мм и длиной 45 см. С его помощью производился изгиб и кручение образцов. Чтобы избежать контакта кристаллов с ферромагнитными деталями, все элементы этой системы были изготовлены из кварца.

Кварцевая трубка, в которой размещались держатели и образец, помещалась в предварительно разогретую печь (СНОЛ 8.2/1100) и выдерживалась там в течение 15 мин для установления температуры 1323 К. После чего в течение 2 мин производилось деформирование образца с последующим извлечением кварцевой трубки и охлаждением системы под проточной водой. (В каждом опыте кроме деформируемой пластины в

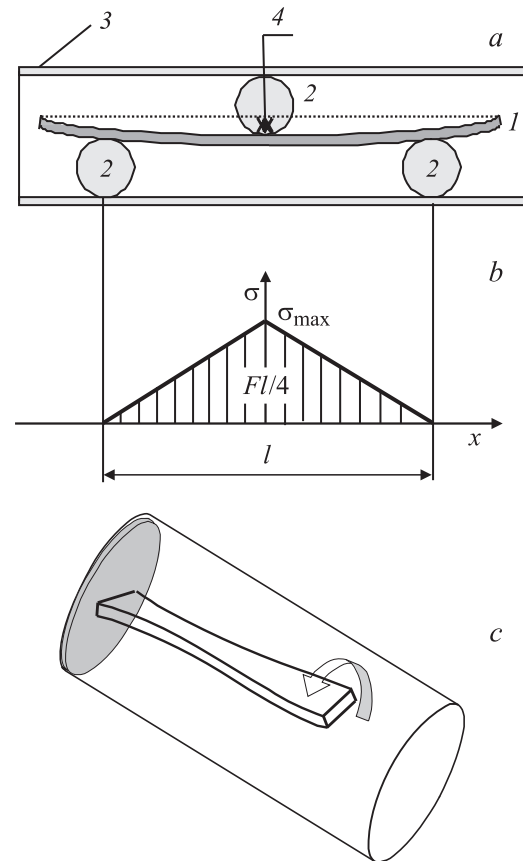


Рис. 1. Схема изгиба пластины кремния при введении дислокаций. *a* — расположение образца: 1 — кремниевая пластина, 2 — кварцевые опоры, 3 — кварцевая труба, 4 — стрела прогиба; *b* — эпюра изгибающих моментов: σ — изгибающий момент, σ_{\max} — максимальный изгибающий момент, F — сила, приложенная при изгибе, l — расстояние между крайней левой и крайней правой кварцевыми опорами; *c* — схема кручения пластины кремния в кварцевой трубке.

трубке находился контрольный образец, испытывающий все тепловые воздействия, кроме деформации). Процесс охлаждения не превышал 5 мин. Характерный вид образца после деформации приведен на рис. 2.

Плотность дислокаций оценивалась после химического травления кристаллов в стандартных растворах для кремния [19] методами оптической и электронной микроскопии. Образцы для исследования магнитных свойств вырезались из области наибольшей деформации пластины с максимальной плотностью дислокаций $\sim 10^7\text{ см}^{-2}$.

В работе исследовано четыре типа образцов: 1) монокристаллы кремния, пластически деформированного кручением, 2) монокристаллы, деформированные изгибом при температуре $T = 1323\text{ К}$ в течение $t = 15\text{ мин}$, 3) контрольные монокристаллы термообработанного кремния при температуре $T = 1323\text{ К}$ в течение $t = 15\text{ мин}$ в отсутствие деформации и 4) контрольные монокристаллы исходного кремния, не подвергавшиеся обработкам.

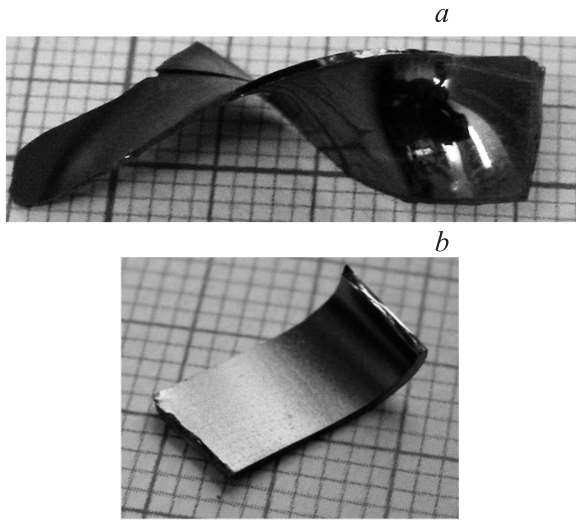


Рис. 2. Фотографии монокристаллического кремния, пластически деформированного кручением (а) и изгибом (б).

Спектры ЭПР были получены на спектрометре Bruker EMX, оснащенный гелиевым криостатом Oxford Instruments ESR-900, в виде зависимостей первой производной поглощенной в образце сверхвысокочастотной (СВЧ) мощности dP/dH от магнитного поля H . Эксперименты проводились при частоте СВЧ-поля 9.48 GHz и частоте модуляции 100 kHz при температурах $T = 8, 25$ и 300 К. Амплитуда модуляции составляла 5 Ое. Чувствительность спектрометра составляла 10^{11} spins/Ое при $T = 4$ К. Образцы располагали в пучности магнитной составляющей СВЧ-поля в прямоугольном резонаторе H_{102} . Угол θ между постоянным магнитным полем и плоскостью пластин кремния устанавливался с точностью $\pm 5^\circ$. Для подсчета эффективного числа спинов в пластически деформированных монокристаллах кремния и калибровки чувствительности спектрометра был использован парамагнитный монокристаллический образец $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$.

Измерения магнитного момента M образцов проводили на сверхпроводящем квантовом интерференционном магнитометре (СКВИД) марки MPMX 5XL, Quantum Design при температурах $T = 2-300$ К в постоянном магнитном поле $H = 10$ кОе. Полученные значения магнитного момента для каждой точки температурной зависимости $M(T)$ пересчитывались в статическую молярную магнитную восприимчивость $\chi = M/\nu H$ (ν — количество вещества).

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Спектры ЭПР, полученные для деформированных кристаллов в настоящей работе, отличались от спектров, полученных в [9,12] при одноосном сжатии кристаллов (рис. 3). Спектр ЭПР монокристаллов кремния, пла-

стически деформированных кручением, при температуре $T = 8$ К состоит из шести линий с g -факторами: $g = 4.28$ (1), $g = 3.40$ (2), $g = 2.05$ (3), $g = 1.99$ (4), $g = 1.41$ (5) и $g = 1.40$ (6) (рис. 4, а). Спектр ЭПР монокристаллов кремния, пластически деформированных изгибом, в тех же условиях состоит из пяти линий с g -факторами $g = 4.28$ (1), $g = 2.05$ (3), $g = 1.99$ (4), $g = 3.21$ (7) и $g = 1.52$ (8) (рис. 4, б). Три изотропные линии с g -факторами $g = 4.28$ (1), $g = 2.05$ (3) и $g = 1.99$ (4) наблюдаются также в контрольных монокристаллах термообработанного кремния при температуре $T = 1323$ К в течение $t = 15$ min в отсутствие деформации (рис. 4, с) и в контрольных монокристаллах исходного кремния, не подвергавшегося обработке. Следовательно, линии 1, 3 и 4 не связаны с деформационными или термодфектами, а отвечают парамагнитным центрам неконтролируемой фоновой примеси, находящейся в образцах. Вычисление интегральной интенсивности линий 1, 3 и 4 и сравнение с калибровочным образцом показывает, что число парамагнитных центров, отвечающих этим линиям, равно $\sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Наблюдаемые линии 1, 3 и 4 в принципе могли бы отвечать легирующей акцепторной добавке — бору или фоновой парамагнитной примеси, например переходных металлов, преимущественно железа. Ранее было установлено, что бор дает сигнал ЭПР только при сжатии кристаллов кремния, снимающем вырождение валентной зоны в кремнии [20]. Величина g -фактора примеси бора является анизотропной и сильно отличается от g -факторов изотропных линий 1, 3 и 4. Перечисленные выше доводы позволяют предполагать, что наблюдаемые линии соответствуют фоновой примеси переходных металлов [21], преимущественно ионов железа. Ранее было

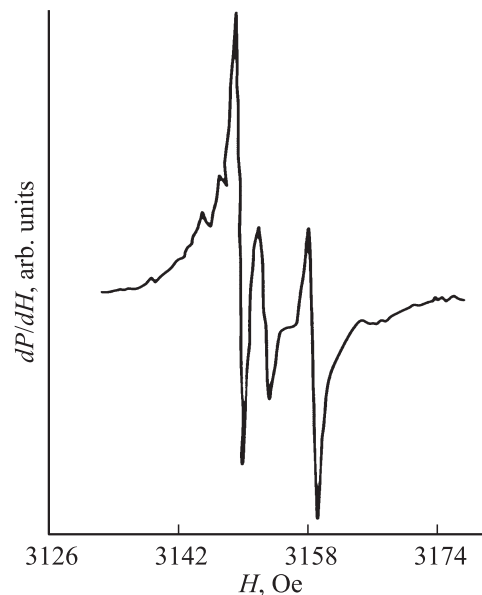


Рис. 3. Спектр ЭПР монокристаллического кремния, пластически деформированного одноосным сжатием вдоль оси [110] при температуре $T = 4.2$ К [12,13].

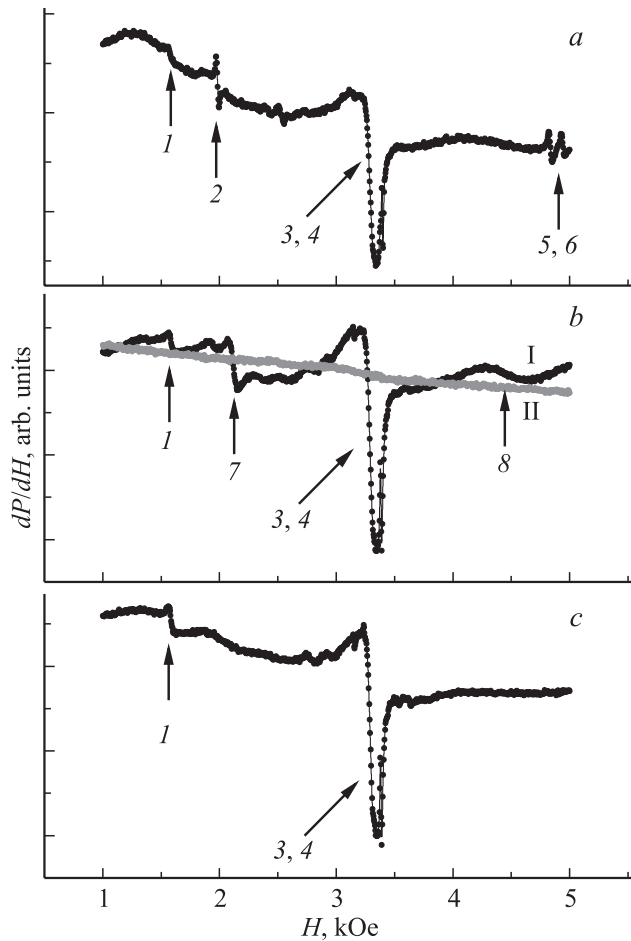


Рис. 4. Спектры ЭПР монокристаллического кремния, пластически деформированного кручением (а) при температуре $T = 8$ К, изгибом (b) при температурах $T = 8$ (I) и 70 К (II), а также контрольных монокристаллов термообработанного кремния в отсутствие деформации (с) при температуре $T = 8$ К. Постоянное магнитное поле спектрометра направлено вдоль плоскости пластины. Цифрами обозначены линии спектра ЭПР.

установлено, что спектр ионов железа в тетраэдрических полупроводниках [22], в том числе в кремнии [23], представлен набором изотропных линий с g -факторами, близкими к g -факторам изотропных линий 1, 3 и 4.

Значения эффективных g -факторов линий 2 и 5, 6 и их анизотропия (рис. 5) указывают на то, что они отвечают двум различным парамагнитным центрам, вводимым пластической деформацией кручения. Деформация изгиба приводит к формированию двух других линий 7 и 8. Ориентационные зависимости g -факторов (рис. 5) линий 2 и 5 были аппроксимированы стандартной формулой для аксиальной симметрии кристаллического поля: $g^2 = g_{\parallel}^2 \cos^2 \theta + g_{\perp}^2 \sin^2 \theta$. Были определены параметры для линии 2 $g_{\parallel} = 3.46$, $g_{\perp} = 3.41$, а для линии 5 $g_{\parallel} = 1.25$, $g_{\perp} = 1.42$. Линии 6–8 наблюдались только при малых углах θ между постоянным магнитным полем спектрометра и плоскостью пластины кремния, поэто-

му ориентационные зависимости соответствующих им g -факторов не могли быть аппроксимированы.

При повышении температуры T интенсивности линий ЭПР убывают и при $T > 25$ К линии перестают наблюдаться (рис. 4, b). Вычисление интегральной интенсивности линий 2, 5–8 и сравнение с калибровочным образцом показывает, что число парамагнитных центров, отвечающих этим линиям, в наших экспериментах было $\sim 1 \cdot 10^{13}$ и $6 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ в образцах, пластически деформированных кручением и изгибом соответственно. Оценка концентрации электронов, локализованных на дислокациях, $N_d f / a$, дает значение $\sim 8 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ($N_d \sim 10^7 \text{ cm}^{-2}$ — плотность дислокаций, $f_0 \leq 0.3$ — фактор заполнения оборванных связей, $a \approx 4 \text{ \AA}$ — среднее расстояние между атомами в кремнии). Следовательно, наблюдаемые резонансные линии пластически деформированных образцов могут соответствовать электронам на дислокациях.

ЭПР-спектрометр чувствителен только к парамагнитным частицам. СКВИД-магнитометр измеряет интегральную намагниченность, включая диамагнитную составляющую кристаллической решетки и диамагнитных дефектов. Поэтому нами были получены температурные зависимости молярной магнитной восприимчивости χ , вычисленной из значений магнитного момента, измеренного на СКВИД-магнитометре (рис. 6). Отжиг сам по себе, в отсутствие деформации, не изменял магнитной восприимчивости монокристаллов кремния. В нашей работе небольшое увеличение магнитной восприимчивости по сравнению с известным значением $\chi \approx -3 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{mol}$ [24,25] для монокристаллов чистого кремния Cz-Si связано с парамагнитным вкладом акцепторной примеси — бором [26] и фоновой примеси ионов переходных металлов, обнаруживаемых нами также и методом ЭПР. Из рис. 6 видно, что изгиб

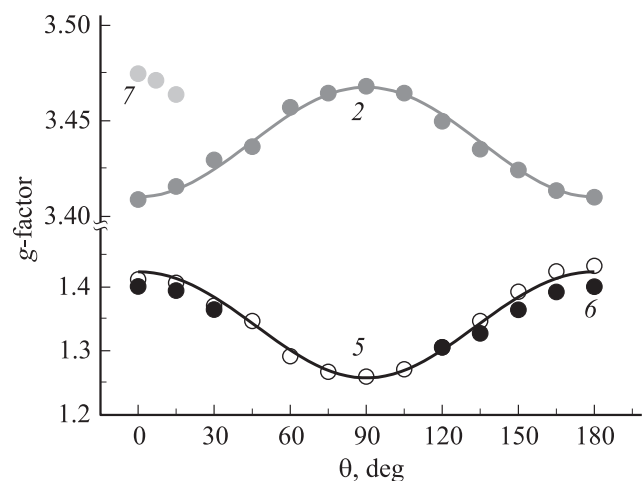


Рис. 5. Ориентационные зависимости g -факторов линий 2, 5–7 спектра ЭПР пластически деформированного кремния при температуре $T = 8$ К. Сплошные линии — аппроксимации стандартной формулой для аксиальной симметрии кристаллического поля (см. текст).

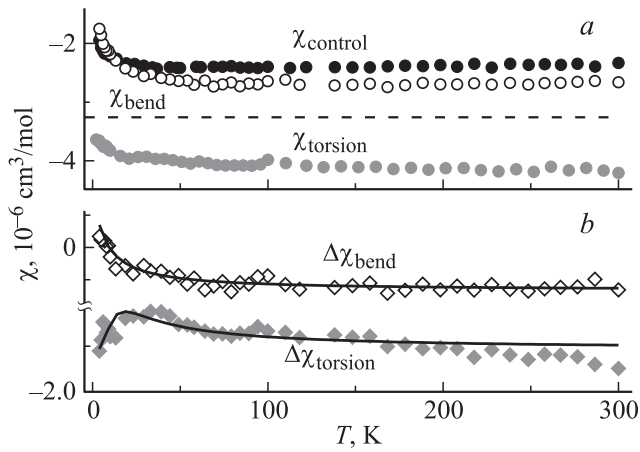


Рис. 6. *a)* Температурные зависимости молярных магнитных восприимчивостей χ монокристаллического кремния, пластически деформированного кручением (χ_{torsion}) и изгибом (χ_{bend}), а также контрольных монокристаллов термообработанного кремния в отсутствие деформации (χ_{control}). Штриховая линия соответствует значению магнитной восприимчивости недеформированного чистого кремния Cz-Si по данным работ [21,22]. *b)* Температурные зависимости вклада в магнитную восприимчивость, образовавшегося в результате пластической деформации кручения $\Delta\chi_{\text{torsion}}$ и изгиба $\Delta\chi_{\text{bend}}$.

и кручение пластин кремния приводят к уменьшению магнитной восприимчивости χ . Это значит, что пластическая деформация приводит не только к появлению парамагнитного вклада от дополнительных центров, дающих линии 2, 5–8 в спектрах ЭПР, но и к дополнительному диамагнитному вкладу, превышающему по величине вариации парамагнитной составляющей магнитной восприимчивости.

Разность магнитных восприимчивостей монокристаллов термообработанного кремния в отсутствие деформации χ_{control} и пластически деформированного кручением χ_{torsion} или изгибом χ_{bend} есть вклад в магнитную восприимчивость $\Delta\chi$, образовавшегося в результате пластической деформации. Разность $\Delta\chi_{\text{bend}} = \chi_{\text{bend}} - \chi_{\text{control}}$ при понижении температуры увеличивается и при температурах $T < 10$ К становится положительной. Это значит, что $\Delta\chi_{\text{bend}}$ есть сумма добавочной (созданной пластической деформацией) диамагнитной составляющей, не зависящей от температуры, и добавочной парамагнитной составляющей, вклад которой при низких температурах преобладает. Поэтому температурную зависимость $\Delta\chi_{\text{bend}}$ аппроксимировали суммой $\Delta\chi_d + C/(T - \Theta)$, где $\Delta\chi_d$ — температурно-независимая диамагнитная составляющая, второе слагаемое есть закон Кюри–Вейсса (C — постоянная Кюри (определяется числом спинов в образце), T — температура, Θ — температура Вейсса). Из аппроксимации были определены значения $\Delta\chi_d = -3 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{mol}$, $C = 3 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3\text{K}/\text{mol}$, $\Theta = -5$ К. Из постоянной Кюри C можно оценить число спинов в образце $2Ck_B\rho/m(\mu_B)^2 \sim 6 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ (здесь k_B — постоянная

Больцмана, ρ — плотность кремния, m — молярная масса кремния, μ_B — магнетон Бора).

В кристаллах, деформированных кручением, прибавка $\Delta\chi_{\text{torsion}} = \chi_{\text{torsion}} - \chi_{\text{control}}$, вызванная деформированием, имеет иную температурную зависимость. Величина $\Delta\chi_{\text{torsion}}$ при понижении температуры сначала увеличивается, а затем при $T < 10$ К начинает убывать, оставаясь отрицательной во всем диапазоне $T = 2-300$ К. Такое немонотонное поведение можно объяснить образованием антиферромагнитных обменных спиновых димеров из парамагнитных фрагментов на дислокациях. Температурная зависимость $\Delta\chi_{\text{torsion}}$ в этом предположении аппроксимировали суммой $\Delta\chi_d + [C/T][(1/3 \exp(-J/T)) + 1]^{-1}$, где $\Delta\chi_d$ — постоянная диамагнитная составляющая, второе слагаемое есть выражение Блيني–Бауэrsa (C — постоянная, определяемая числом спинов в образце, T — температура, J — обменный интеграл). Из аппроксимации определили значения $\Delta\chi_d = -2 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{mol}$, $C = 0.4 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3\text{K}/\text{mol}$, $J = -15$ К. Из постоянной C можно оценить число спинов в образце $3Ck_B\rho/2m(g\mu_B)^2 \sim 1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (здесь k_B — постоянная Больцмана, ρ — плотность кремния, m — молярная масса кремния, μ_B — магнетон Бора, g — g -фактор, принятый нами равным 2).

По данным, полученным двумя независимыми методами СКВИД-магнитометрии и ЭПР, число парамагнитных центров в образце, пластически деформированном изгибом, на порядок выше, чем в образце, пластически деформированном кручением. Таким образом, оба метода оценки числа вводимых пластической деформацией парамагнитных центров хорошо согласуются между собой. В то же время абсолютные значения числа парамагнитных центров, полученные путем двукратного интегрирования спектров ЭПР, на три порядка ниже, чем оцененные из данных СКВИД-магнитометрии. Это может быть объяснено существованием очень широких линий, которые невозможно наблюдать в обычных условиях, или резонансных линий в более высоких магнитных полях, превышающих использованные поля в настоящей работе.

Число диамагнитных центров, созданных этими видами пластической деформации, различается. Ранее было показано, что структурный беспорядок в кремнии и германии приводит к увеличению диамагнитной восприимчивости кристаллов [2]. Так, например, аморфный германий в 3 раза более диамагнитен, чем монокристаллический [24]. Причина состоит в изменении углов и длин химических связей Si–Si, что приводит к увеличению диамагнетизма внутренних и внешних (валентных) электронов атомов Si. В аддитивной схеме Паскаля это эквивалентно уменьшению положительной (парамагнитной) поправки на химическую связь. Когда известно, что число парамагнитных центров в образце постоянно, отрицательные значения Θ или J могут означать, что с понижением температуры между спинами возникают антиферромагнитные обменные взаимодей-

ствия. В нашем случае концентрация парамагнитных центров может изменяться с температурой, например из-за термоактивируемого заселения оборванных связей дислокаций носителями заряда.

Обсудим природу парамагнитных центров, вводимых пластической деформацией. Эффективный g -фактор свободных носителей заряда $g \approx 2.0023$. Отклонение Δg наблюдаемого g -фактора от значения $g \approx 2.0023$ может быть обусловлено спин-орбитальной связью и приблизительно равно $\lambda/\Delta E$ [20], где λ — константа спин-орбитальной связи, ΔE — расстояние до ближайшей зоны, волновые функции которой примешиваются к основному состоянию, ≈ 3.5 eV [20]. Оцененное значение сдвига наблюдаемого g -фактора для этого случая $\Delta g < 0.01$. Мы также оценили вклад, вносимый в изменение g -фактора спин-орбитальной связью, обусловленной примесными ионами, аналогично тому, как это сделано в работах [27,28]. Этот сдвиг $\Delta g \approx 0.01$ также не может объяснить наблюдаемые значения g -факторов. Можно предположить, что отклонение $|\Delta g| \sim 2(\mu_L/\mu_S)$ [29] наблюдаемого значения g -фактора от соответствующего значения для свободного электрона связано с примешиванием орбитального магнитного момента μ_L электронов, движущихся по поверхности дислокационной трубки, к чисто спиновому значению μ_S . В настоящее время трудно ответить на вопрос о природе исследуемых новых дефектов в пластически деформированном кремнии. Близость g -факторов некоторых линий пластически деформированных образцов к g -факторам бора в кремнии, подвергнутом сжатию ($g = 2.43$ — магнитное поле направлено вдоль оси деформации, $g = 1.21$ — магнитное поле направлено перпендикулярно оси деформации) [20], свидетельствует о том, что атомы бора могут входить в состав исследуемых дефектов.

4. Заключение

Установлено, что интенсивная пластическая деформация пластин монокристаллического кремния Cz-Si при температурах, близких к температуре плавления, приводит к появлению в спектре ЭПР новых резонансных линий и уменьшению статической магнитной восприимчивости. Вид спектра ЭПР и температурная зависимость статической магнитной восприимчивости оказываются чувствительными к виду пластической деформации (изгиб и кручение). Парамагнитные центры, вводимые при изгибе и кручении, и их спектры ЭПР отличаются от исследованных ранее в монокристаллах кремния, пластически деформированного одноосным сжатием. Анализ температурной зависимости магнитной восприимчивости позволяет предполагать, что существует отрицательное обменное взаимодействие между парамагнитными центрами, генерируемыми при интенсивной деформации кристаллов.

Авторы признательны А.Л. Бучаченко и В.А. Радцигу за стимулирующие обсуждения.

Список литературы

- [1] И.И. Солошенко, А.Ф. Золотарев. Механизмы внутреннего трения в полупроводниковых и металлических материалах. Наука, М. (1972). С. 35.
- [2] А.М. Орлов, А.А. Скворцов, А.А. Соловьев. ЖЭТФ **123**, 1 (2003).
- [3] М.В. Бадылевич, Ю.Л. Иунин, В.В. Кведер, В.И. Орлов, Ю.А. Осипьян. ЖЭТФ **124**, 664 (2003).
- [4] I. Yonenaga, K. Takahashi, T. Taishi, Y. Ohno. Physica B **401**, 148 (2007).
- [5] I. Yonenaga, K. Takahashi. J. Appl. Phys. **101**, 053 528 (2007).
- [6] Р.Б. Моргунов. УФН **174**, 131 (2004).
- [7] Ю.А. Осипьян, Р.Б. Моргунов, А.А. Баскаков, А.М. Орлов, А.А. Скворцов, Е.Н. Инкина, Й. Танимото. Письма в ЖЭТФ **79**, 158 (2004).
- [8] M. Badylevich, V. Kveder, V. Orlov, Yu. Ossipyan. Phys. Status Solidi C, **2**, 1869 (2005).
- [9] H. Alexander, R. Labusch, W. Sander. Solid State Commun. **3**, 357 (1965).
- [10] F.D. Wohler, H. Alexander, W. Sander. J. Phys. Chem. Solids **31**, 1381 (1970).
- [11] U. Schmidt, E. Weber, H. Alexander, W. Sander. Solid State Commun. **14**, 735 (1974).
- [12] В.А. Гражулис, Ю.А. Осипьян. ЖЭТФ **58**, 1259 (1970).
- [13] В.А. Гражулис, Ю.А. Осипьян. ЖЭТФ **60**, 1150 (1971).
- [14] В.В. Кведер, Ю.А. Осипьян. ФТП **16**, 1930 (1982).
- [15] С.В. Броуде, В.А. Гражулис, В.В. Кведер, Ю.А. Осипьян. ЖЭТФ **66**, 1469 (1974).
- [16] М.Н. Золотухин, В.В. Кведер, Ю.А. Осипьян. ЖЭТФ **81**, 299 (1981).
- [17] В.В. Кведер, Ю.А. Осипьян. ЖЭТФ **80**, 1206 (1981).
- [18] Ю.А. Осипьян, С.И. Бредихин, В.В. Кведер, Н.В. Классен, В.Д. Негрий, В.Ф. Петренко, И.С. Смирнова, С.А. Шевченко, С.З. Шмурак, Э.А. Штейнман. Электронные свойства дислокаций в полупроводниках. Эдиториал УРСС, М. (2000). 320 с.
- [19] В.С. Коваленко. Металлографические реактивы. Металлургия, М. (1981). 120 с.
- [20] Н.А. Пенин. Электронный спиновый резонанс в полупроводниках. ИИЛ, М. (1962). 380 с.
- [21] К. Рейви. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. Мир, М. (1984). 475 с.
- [22] A. Goltzene, G. Poiblaud, C. Schwab. J. Appl. Phys. **50**, 5425 (1979).
- [23] C.A.J. Ammerlaan. Defect complexes in semiconductor structures. Lecture notes in physics. Springer, Amsterdam (1983). V. 175. P. 111.
- [24] S. Hudgens, M. Kastner, H. Fritzsche. Phys. Rev. Lett. **33**, 1552 (1974).
- [25] A. Roy, M. Turner, M.P. Sarachik. Phys. Rev. B **37**, 5522 (1988).
- [26] M.P. Sarachik, D.R. He, W. Li, M. Levy, J.S. Brooks. Phys. Rev. B **31**, 1469 (1985).
- [27] R.B. Morgunov, A.I. Dmitriev, Y. Tanimoto, O. Kazakova. J. Appl. Phys. **105**, 093922 (2009).
- [28] Р.Б. Моргунов, А.И. Дмитриев, Ф.Б. Мушенков, О.Л. Казакова. ФТП **43**, 928 (2009).
- [29] M. Farle. Rep. Prog. Phys. **61**, 755 (1998).