

05; 12

ИЕРАРХИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ДИСЛОКАЦИОННЫХ ПИКОВ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ В НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛАХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

С. А. Антипов, А. И. Дрожжин, И. В. Мишин, А. М. Роцулкин

Приведены экспериментальные результаты изучения внутреннего трения (Q^{-1}) в различных образом пластически деформированных при $0.7-0.8 T_{пл}$ нитевидных кристаллах (НК) кремния. В диапазоне $180-300$ К обнаружен целый ряд пиков Q^{-1} в пластически деформированных НК. Экспериментально определенная энергия активации составила от 0.24 до 0.6 эВ, частотный фактор от 10^9 до 10^{12} с $^{-1}$. Показано, что обнаруженный релаксационный спектр внутреннего трения обусловлен релаксацией типа Хасигути.

Область температур ниже комнатной в настоящее время представляется «белым пятном» в отношении исследований подвижности дислокаций в кристаллах полупроводников с высокими барьерами Пайерлса. Основным сдерживающим фактором здесь является крайне высокая хрупкость этих кристаллов, из-за которой даже сам факт низкотемпературной пластической деформации скольжением в таких типичных для практики экспериментальных исследований материалах с высокими барьерами Пайерлса, как кремний и германий, не установлен однозначно при обычных условиях механических испытаний. Лишенными в большой мере указанного недостатка являются нитевидные кристаллы (НК) полупроводников, поскольку в исходном состоянии они имеют идеальную кристаллическую структуру, совершенство которой можно изменять в широких пределах путем высокотемпературной пластической деформации. Именно таким образом в работе [1] при $T=300-700$ К удалось обнаружить anomalно высокий уровень внутреннего трения (Q^{-1}) в НК кремния, предварительно пластически деформированных при $T > 0.8 T_{пл}$, где $T_{пл}$ — температура плавления кремния. Метод внутреннего трения известен давно, и как способ исследования подвижности дислокаций его трудно переоценить. Анализ температурной и амплитудной зависимостей Q^{-1} позволил в дальнейшей работе [2] сделать вывод об ответственности за anomalное затухание в кремнии при $300-700$ К релаксации типа Хасигути. Однако сами пики Хасигути при этом не наблюдались, что тем не менее не исключало возможность их обнаружения в области более низких температур.

С целью проверки этого предложения, а также дальнейшего изучения обнаруженной релаксации в настоящей работе проведено детальное исследование низкочастотного внутреннего трения в НК кремния в области температур $150-300$ К. Первые результаты этих исследований сообщены нами в кратком сообщении в ЖТФ [3].

1. Материалы и методика эксперимента

В качестве образцов для исследований были выбраны НК p -Si, выращенные методом химических газотранспортных реакций в закрытой ампуле [4]. Для выращивания НК использовалась навеска, состоящая из смеси кремния марки

КЭФ и КДБ с удельным сопротивлением $6.5 \cdot 10^{-2}$ и $1 \cdot 10^{-3}$ Ом·м соответственно, причем кремния марки КДБ использовалось на порядок больше. Для инициирования роста НК в исходный материал добавлялись примеси золото плюс платина. Выращенные НК кремния имели удельное сопротивление $\approx 1 \cdot 10^{-3}$ Ом·м, ось роста $\langle 111 \rangle$ и гранку (211). Для экспериментов отбирались образцы, имеющие малую $\sim 10^{-4}$ конусность, с диаметром $1.3\text{--}2.8 \cdot 10^{-5}$ м и рабочей длиной $1.5\text{--}2.5 \cdot 10^{-3}$ м. Выбор НК для исследований, изучение их структуры и механических свойств осуществлялись по методикам [5]. Температурная $Q^{-1}(T)$ и амплитудная $Q^{-1}(\gamma)$ зависимости внутреннего трения исследовались на низких частотах $f \approx 1\text{--}3$ Гц крутильных колебаний в вакууме $5 \cdot 10^{-3}$ Па при действии на образец осевой нагрузки растяжения $(5\text{--}60) \cdot 10^5$ Па.

2. Результаты эксперимента

В исходном состоянии в широком диапазоне температур $150\text{--}900$ К фон внутреннего трения в НК мал $\approx 0.5\text{--}1 \cdot 10^{-4}$ и не имеет никаких особенностей. Кроме того, в этой области температур вплоть до амплитуд деформаций $\gamma \sim 10^{-3}$

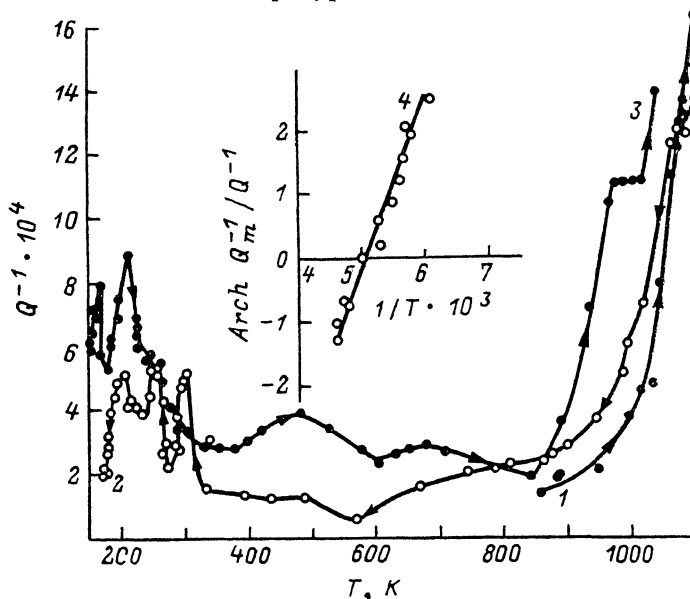


Рис. 1. Температурные зависимости $(1\text{--}3) Q^{-1}$ НК Si диаметром $1.3 \cdot 10^{-3}$ м при $\sigma_p = 5.6 \times 10^6$ Па, $f = 1.23$ Гц.

1 — нагрев после отжига при 900 К в течение $1.9 \cdot 10^3$ с, 2 — охлаждение после циклического знакопеременного нагружения при 1100 К $3.69 \cdot 10^3$ циклами с $\gamma = \pm 3.1 \cdot 10^{-3}$, 3 — после старения при 295 К в течение $5.85 \cdot 10^4$ с и дополнительного циклического знакопеременного нагружения $4.4 \cdot 10^3$ циклами с $\gamma = \pm 7 \cdot 10^{-3}$ при 135 К, 4 — пик Q^{-1} .

внутреннее трение является амплитудонезависимым. Отсутствие каких-либо аномалий на зависимостях $Q^{-1}(T) f^2(T)$ и $Q^{-1}(\gamma)$ свидетельствует о высоком структурном совершенстве НК, что подтверждается металлографическими и рентгеновскими исследованиями кривых качания методом однокристалльного спектрометра на дифрактометре ДРОН-2.

В исходных, бездислокационных образцах под действием осевой нагрузки растяжения σ_p и знакопеременного кручения, задаваемого маятником в процессе измерения внутреннего трения при высоких температурах, происходит пластическая деформация НК, что подтверждается наблюдаемым в эксперименте резким ростом фона Q^{-1} выше 900 К и возвратом внутреннего трения в случае выдерживания образца при высокой ≈ 1100 К температуре (рис. 1, кривые 1, 2). По истечении времени одного цикла изохронного нагрева до температур $\approx 0.8 T_{11}$ и охлаждения до 295 К при непрерывном воздействии на образец знакопеременных крутильных колебаний с амплитудой $\gamma = 3 \cdot 10^{-5}$ НК претерпевает несколько десятков тысяч циклов нагружений (рис. 1, кривая 2). В результате этого Q^{-1}

возрастает по сравнению с исходным уровнем в 1.5—2 раза практически во всем исследуемом диапазоне температур, а при температурах 150—300 К наблюдается формирование нескольких пиков внутреннего трения (рис. 1, кривая 2). Эти пики носят релаксационный характер, так как смещаются в сторону высо-

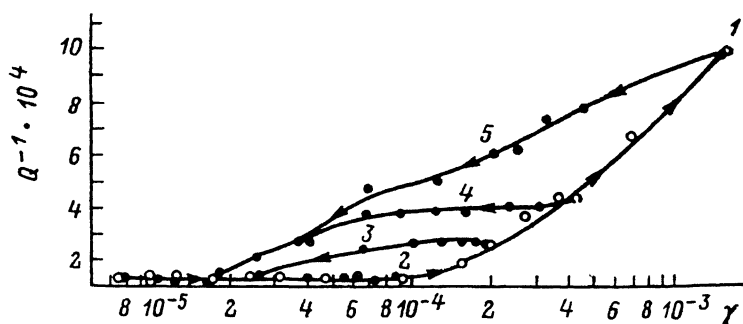


Рис. 2. Амплитудная зависимость Q^{-1} при 295 К НК Si диаметром $2.76 \cdot 10^{-5}$ м, пластически деформированного знакопеременным кручением при 996 К на $\gamma = \pm 1.8 \cdot 10^{-4}$, $7.9 \cdot 10^4$ циклами при действии осевой нагрузки растяжения $\sigma_p = 4.4 \cdot 10^6$ Па.

1 — прямой ход, 2—5 — обратный.

ких температур при увеличении частоты колебаний. Обработка пиков Q^{-1} в координатах $\text{Arsh}(Q_m^{-1}/Q^{-1}) \sim 1/T$ дает прямую линию, как, например, в случае максимума внутреннего трения при 200 К (рис. 1, кривая 4). Энергия активации этого процесса, определенная по тангенсу угла наклона прямой, составила 0.25 ± 0.1 эВ, а частотный фактор — $\approx 10^{10} \text{ с}^{-1}$ (рис. 1, кривая 4).

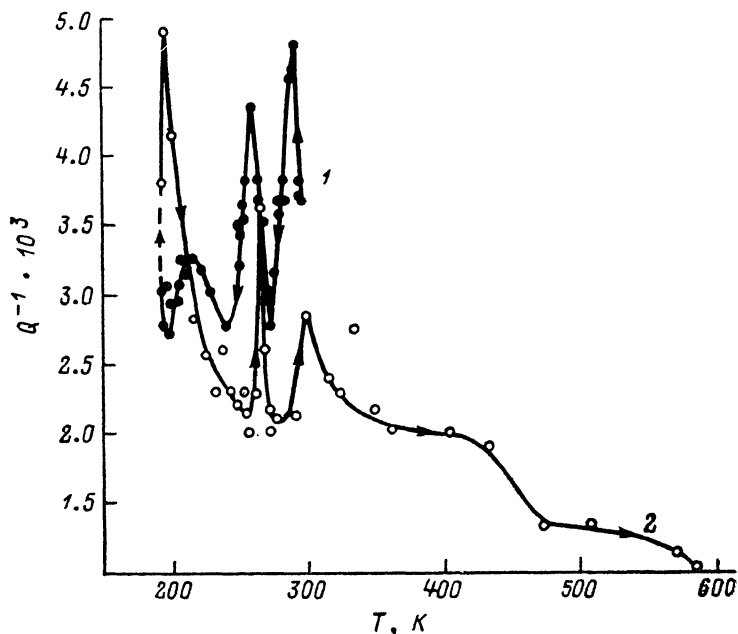


Рис. 3. Температурные зависимости Q^{-1} НК Si диаметром $1.3 \cdot 10^{-6}$ м при $\sigma_p = 5.6 \cdot 10^6$ Па, $f = 1.23$ Гц с $\gamma = \pm 3.1 \cdot 10^{-6}$, деформированного кручением при 1015 К на $\gamma_{\text{max}} = 1.2 \cdot 10^{-3}$, после старения при 295 К в течение $9 \cdot 10^8$ с.

1 — охлаждение, 2 — нагрев.

Исследование амплитудной зависимости внутреннего трения показало, что в предварительно пластически деформированных НК Q^{-1} является амплитудозависимым не только при 295 К (рис. 2), но и при 150 К, причем на зависимости $Q^{-1}(\gamma)$ наблюдается гистерезис. Замечено, что критическая амплитуда начала нелинейной зависимости $Q^{-1}(\gamma)$ тем меньше, чем выше температура деформирования НК.

Последующее старение такого образца при 295 К приводит к росту фона внутреннего трения, увеличению и усложнению пиков Q^{-1} в области температур 150—300 К, причем этот процесс протекает тем ярче, чем больше время старения (рис. 1, кривая 3). Это свидетельствует о том, что существенную роль в формировании спектра внутреннего трения при низких температурах играют диффузионные процессы.

Увеличение степени пластического деформирования осевым кручением одного знака до 0.1 % при 0.7—0.8 $T_{пл}$ приводит к тому, что ранее появившиеся мак-

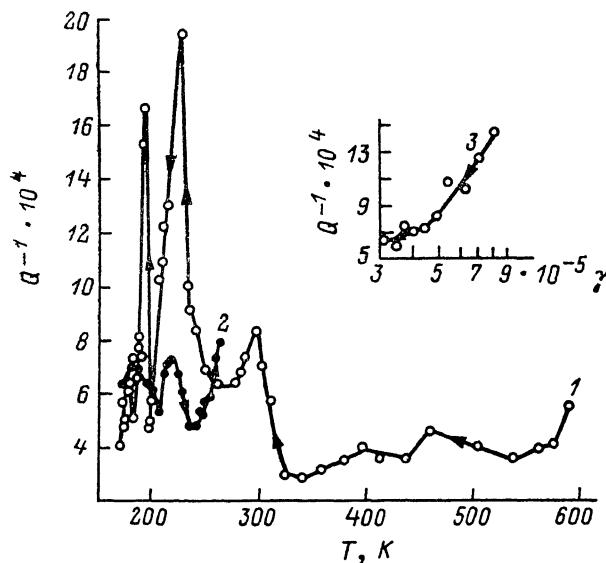


Рис. 4. Температурные зависимости Q^{-1} НК Si диаметром 1.3×10^{-5} м при $\sigma_p = 5.6 \cdot 10^6$ Па, $f = 1.23$ Гц с $\gamma = \pm 3.1 \cdot 10^{-5}$, деформированного кручением.

1 — охлаждение, 2 — нагрев, 3 — зависимость $Q^{-1}(\gamma)$ при 170 К деформированного кручением НК Si после старения при 295 К в течение $9 \cdot 10^3$ с и отжига при 1000 К в течение $2 \cdot 10^5$ с.

симумы Q^{-1} (рис. 1, кривая 2) резко увеличиваются (почти на порядок) по высоте, причем наиболее ярко в этом случае выделяется пик Q^{-1} при 265 К на частоте 1 Гц, имеющий энергию активации 0.5 ± 0.1 эВ, а частотный фактор $\approx 10^{11}$ с $^{-1}$. Одновременно в таких образцах наблюдаются пики внутреннего

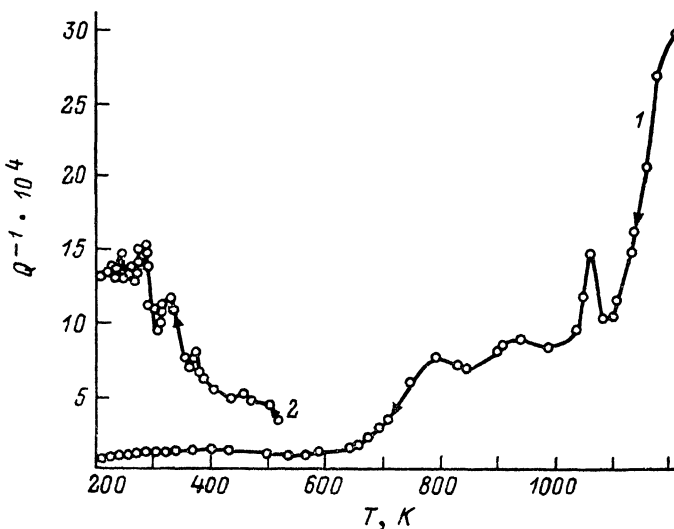


Рис. 5. Температурные зависимости Q^{-1} НК Si диаметром $2.24 \cdot 10^5$ м при $\sigma_p = 6.68 \cdot 10^5$ Па, $f = 1.7$ Гц.

1 — $\gamma = \pm 3.9 \cdot 10^{-5}$; 2 — $\gamma = 5.9 \cdot 10^{-5}$ повторно деформированного осевым кручением НК при 1340 ± 15 К на 0.74 % с $\gamma = 2.77 \cdot 10^{-4}$ с $^{-1}$; 1 — сразу после деформирования, 2 — после старения при 295 К $7.2 \cdot 10^4$ с и знакопеременного кручения при 295 К с $\gamma = \pm 10^{-3}$ циклами $3.5 \cdot 10^5$.

трения в диапазоне температур 600—1000 К. Старение при 295 К такого образца приводит к росту Q^{-1} и усложнению спектра внутреннего трения в диапазоне температур 150—300 К (рис. 3), наблюдаемому как при охлаждении, так и при нагреве.

Воздействие циклического кручения в процессе измерения Q^{-1} в пластически деформированном НК приводит к тому, что начиная с температур ≈ 500 К

происходит возврат внутреннего трения (рис. 3, кривая 2). Одновременно при этих же температурах начинается возврат формы пластически деформированных НК. Поэтому кратковременный отжиг в процессе измерения температурной зависимости Q^{-1} вплоть до 1000 К привел к уменьшению фона Q^{-1} , однако низкотемпературные пики наблюдались как при охлаждении, так и при отогреве (рис. 4, кривые 1, 2). В этом случае также отмечено амплитудозависимое внутреннее трение, начиная с амплитуд $\approx 4 \cdot 10^{-5}$ при 170 К (рис. 4, кривая 3).

Рентгеноструктурные исследования кривых качания таких образцов показали, что пики измеряемых отражений $(220)_\alpha$ либо увеличивали полуширину с уменьшением высоты по сравнению с исходными НК, либо происходило размытие дублета K_α , причем тем сильнее, чем выше степень и температура деформирования. Увеличение полуширины отражений и размытие дублета говорят о том, что пластически деформированный образец содержит дислокации [6].

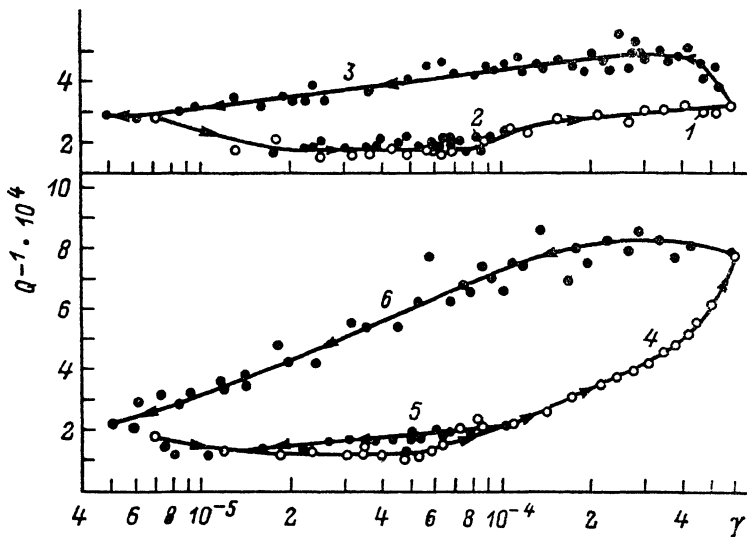


Рис. 6. Амплитудные зависимости Q^{-1} при 205 К (1—3) и 295 К (4—6) НК Si диаметром 2.33×10^{-5} м, повторно деформированного осевым кручением при 1305 К на 2.83 % при $\sigma_p = 6.17 \cdot 10^5$ Па, сразу после деформирования (1—3) и НК, выдержанного при 295 К в течение $5.76 \cdot 10^4$ с (4—6).

Анализ всех шести отражений позволил сделать вывод, что на начальной стадии деформация может проходить в основном в одной или двух из трех эквивалентных в кристаллографическом отношении плоскостях, одинаково ориентированных ко внешнему напряжению.

Значительное ~ 1 % и более деформирование НК осевым кручением в диапазоне $0.7-0.8 T_{пл}$ или деформирование при температурах более $0.8 T_{пл}$ приводит к тому, что в таких образцах на зависимости $Q^{-1}(T)$ сразу после деформирования в области температур 700—1100 К наблюдается семейство пиков типа Бордони [7], а в низкотемпературной области затухание механических колебаний при этом мало (рис. 5, кривая 1). Изучение амплитудной зависимости внутреннего трения в таких образцах показало, что сразу после деформирования Q^{-1} зависит от амплитуды деформации, но очень незначительно (рис. 6, кривые 1—3). Однако старение при 295 К таких образцов приводит к тому, что амплитудная зависимость внутреннего трения проявляется более ярко и на зависимости $Q^{-1}(\gamma)$ наблюдается гистерезис (рис. 6, кривые 4—6). Одновременно в этом случае на температурной зависимости Q^{-1} наблюдается рост фона внутреннего трения в виде непрерывного семейства низкотемпературных пиков (рис. 5, кривая 2).

Рентгеноструктурный анализ кривых качания сильно деформированных образцов показывает, что в этом случае отраженные пики рентгеновского излучения размываются совсем. Однако на месте дублета K_α возникает целое семейство непрерывных маленьких пиков отражения суммарной шириной до $10-$

Температура Q_{\max}^{-1} , К	Активационные характеристики пиков		Вид деформирования, приводящий к наблюдению пиков внутреннего трения
	H, эВ	τ_0^{-1} , с ⁻¹	
290 ± 10	0.60	10 ¹²	Осевое кручение, циклическое кручение Осевое растяжение, осевое кручение, циклическое кручение
265 ± 8	0.50	10 ¹¹	
232 ± 12	0.40	10 ¹¹	Осевое растяжение, циклическое кручение Осевое кручение, циклическое кручение
211 ± 5	0.37	10 ¹⁰	
193 ± 7	0.27	10 ¹⁰	Осевое растяжение, осевое кручение, циклическое кручение То же
161 ± 7	0.24	10 ⁹	

15°, причем в таких образцах эти отражения повторяются через $\approx 60^\circ$. Внешне такой НК имеет значительное формоизменение.

В работе исследовалась также зависимость $Q^{-1}(T)$ и $Q^{-1}(\gamma)$ в образцах, пластически деформированных при $T \approx 0.8 T_{\text{пл}}$ осевой нагрузкой растяжения. В таких НК в низкотемпературной области также наблюдались максимумы внутреннего трения и амплитудная зависимость Q^{-1} .

Обработка и анализ всех низкотемпературных максимумов внутреннего трения, наблюдаемых в различном образом пластически деформированных НК кремния, дал результаты, представленные в таблице. Расчет активационных характеристик низкотемпературных пиков внутреннего трения в НК кремния производился по графику зависимости $\text{Arch}(Q_m^{-1}/Q^{-1})(1/T)$ с использованием метода наименьших квадратов. В таблице приведены усредненные данные по всем пикам Q^{-1} во всех исследованных образцах.

Обсуждение экспериментальных результатов

Исходя из того, что аномально высокое затухание в диапазоне температур 150—300 К обнаруживается лишь после того, как образец был пластически продеформирован при температурах выше $0.8 T_{\text{пл}}$, следует сделать вывод, что за его природу, помимо дислокаций, ответственны также и собственные точечные дефекты кристаллической решетки, возникающие при пластической деформации в указанных условиях. Отметим, что в отличие от пластической деформации при растяжении, сопровождающейся образованием и движением дислокаций разного знака в одинаковом количестве (что создает предпосылки для образования собственных точечных дефектов), при пластической деформации в условиях кручения появляется дислокации преимущественно одного знака и, следовательно, образование точечных дефектов может происходить при достаточно высокой температуре, при которой начинает работать диффузионный механизм пластичности. В этом же интервале температур выше $0.8 T_{\text{пл}}$ изменяется механизм пластической деформации кремния [8], наблюдается двойное поперечное скольжение дислокаций, приводящее к созданию неравновесной концентрации собственных точечных дефектов. Кроме того, здесь образец пластически деформируется растяжением под действием осевой нагрузки, применяемой для измерения внутреннего трения [5], и, наконец, высокой температуры, при которой равновесная концентрация вакансий уже сама по себе достигает заметной величины [9]. С другой стороны, достаточная для наблюдения эффекта плотность собственных точечных дефектов возникает и в результате циклирования [5], необходимого для измерения затухания, при котором пластическая деформация сопровождается движением дислокаций разного знака. В пластически деформированном указанным способом НК кремния дефектная структура очень сложна и состоит как из дислокаций разного типа, точечных дефектов и их комплексов, так и из комбинаций точечных дефектов и дислокаций различных конфигураций, а при больших степенях деформации из блоков, разделенных дислокационными границами.

Таким образом, отмеченные факты позволяют предположить, что наблюдаемые после деформации пики Q^{-1} в диапазоне температур 150—300 К могут быть обусловлены либо только точечными дефектами, либо только дислокациями или взаимодействием дислокаций с точечными дефектами.

То, что это затухание не связано только с точечными дефектами, следует хотя бы из того факта, что выдержка пластически деформированного выше $0.8 T_{\text{пл}}$ кристалла при комнатной температуре приводит к увеличению внутреннего трения. Выдержка же при комнатной температуре исходного (бездислокационного) образца либо пластически деформированного нагрузкой одного знака при температурах ниже $0.6 T_{\text{пл}}$, когда генерация точечных дефектов в процессе деформации ограничена, не приводят к изменению его внутреннего трения в диапазоне температур 150—300 К. Следовательно, определяющую роль в формировании затухания играют дислокации, к которым стекают точечные дефекты. Конечно, в качестве стоков неравновесных точечных дефектов могут быть и другие объекты, в частности поверхность кристалла. Однако в этом случае затухание должно было бы уменьшаться с течением времени (поскольку все эффекты внутреннего трения, обусловленные точечными дефектами, пропорциональны их концентрации), а не возрасти, как это имеет место в эксперименте.

Наблюдаемое в настоящей работе аномальное затухание нельзя отнести также только за счет дислокаций, например релаксации типа Бордони, поскольку, как показано ранее, пики Q^{-1} , обусловленные рождением и движением одиночных и двойных $[10^{-13}]$ термических перегибов на дислокациях на частоте ~ 1 Гц, приходятся на диапазон температур 700—1000 К, а энергии активации ответственных за них процессов составляют 1.4—1.6 эВ и 1.9—2.2 эВ соответственно, что хорошо согласуется с экспериментальными значениями энергии активации движения индивидуальных дислокаций $[14, 15]$. В то же время аномальное затухание нельзя считать связанным с термоактивируемым движением одиночных (геометрических) перегибов через барьеры Пайерлса II рода $[16]$, поскольку, как было показано ранее $[17]$, такого рода пик Q^{-1} наблюдается при температуре около 150 К на частоте $\simeq 400$ Гц и его энергия активации составляет 0.12 эВ. Наблюдаемое затухание нельзя также идентифицировать и с релаксационным пиком Q^{-1} , связанным с гетерогенным зарождением дислокаций, поскольку указанный пик наблюдается при температуре 1300 К, а энергия активации процесса, ответственного за его природу, составляет 3.2 эВ $[18]$.

Если даже предположить, что за наблюдаемое затухание ответственны только дислокации, то отмеченное выше обстоятельство относительно выдержки кристалла при комнатной температуре сводит это предположение на нет, так как дислокации в кремнии в отсутствие внешних напряжений при комнатной температуре макроскопически неподвижны ввиду высоких барьеров Пайерлса.

Таким образом, следует предположить, что за экспериментально наблюдаемое аномальное затухание ответственно взаимодействие дислокаций с точечными дефектами или их комплексами. Следует иметь в виду, что точечные дефекты могут играть роль центров пиннинга и увеличение их концентрации на дислокациях, приводящее к уменьшению длины дислокационных отрезков, должно влиять на внутреннее трение. Однако уменьшение длины дислокационных отрезков в таких механизмах, как дислокационный резонанс, должно приводить при низких частотах к уменьшению внутреннего трения $[19]$, а не к его увеличению, как это следует из эксперимента. С другой стороны, согласно модели КГЛ $[19]$, рост концентрации точечных дефектов на дислокациях вследствие изотермического отжига при 300 К должен сместить критическую амплитуду в сторону больших амплитуд, что также противоречит результатам эксперимента. Впрочем, дислокационный резонанс может быть отброшен уже по той простой причине, что с повышением температуры коэффициент фоновонного торможения растет $[20]$, что не согласуется с поведением $Q^{-1}(T)$ в исследованной температурной области, где выполняются условия $f\tau < 1$. Здесь $\tau = BL^2/12C$, B — константа динамического торможения дислокаций, L — средняя длина дислокационных сегментов, C — коэффициент линейного натяжения дислокаций.

Исходя из вышеуказанного, следует сделать вывод, что за наблюдаемую аномалию затухания ответственны другие механизмы внутреннего трения, связан-

ные с взаимодействием дислокаций с точечными дефектами. Этим взаимодействием обусловлена, в частности, релаксация Снука—Кестера [21], при которой подвижность дислокаций ограничена диффузионной подвижностью закрепляющих их точечных дефектов. С другой стороны, если подвижность точечных дефектов невысока, как это имеет место при комнатных температурах, то подвижность дислокаций будет ограничена термофлюктуационным преодолением дислокациями этих точечных дефектов. Однако и в том, и в другом случае с ростом амплитуды крутильных колебаний величина Q^{-1} при низких частотах ($\omega \ll \tau^{-1}$) должна падать, что объясняется уменьшением времени релаксации типа Снука—Кестера при увеличении подвижности дислокаций. Отмеченный факт находится в противоречии с результатами проведенных экспериментов по исследованию амплитудной зависимости внутреннего трения в нитевидных кристаллах кремния. С ростом температуры время релаксации типа Снука—Кестера уменьшается, поэтому высокочастотный случай ($\omega \gg \tau^{-1}$) должен быть сразу исключен из анализа по причине наблюдаемой в эксперименте убывающей зависимости $Q^{-1}(T)$.

Однако никаких трудностей в интерпретации экспериментальных данных не возникает, если обратиться к релаксации Хасигути, достаточно подробно исследованной в деформированных ГЦК металлах [21]. На то, что обнаруженные в данной работе пики внутреннего трения являются типа Хасигути, указывает целый ряд перечисленных в [2] и подтвержденных здесь экспериментальных фактов, хорошо согласующихся с характеристиками этих пиков, описанных в [21]. Обращает на себя внимание то обстоятельство (см. таблицу), что с уменьшением энергии активации при переходе от одного пика к другому, расположенному ниже по температуре, уменьшается также и частотный фактор. Это, по всей видимости, общая закономерность спектра внутреннего трения, связанного с термоактивируемым преодолением геометрическими перегибами точечных дефектов. Важным обстоятельством в понимании этого экспериментального факта является учет взаимодействия между перегибами. Если это взаимодействие не принимать во внимание, то разброс в энергиях активации пиков можно было бы связать с различием перегибов на дислокациях разных систем скольжения, по-разному взаимодействующих с точечными дефектами и их комплексами. Однако в этом случае частотный фактор для всех пиков должен быть примерно одинаков и приближаться к атомным частотам, что тем не менее не подтверждается экспериментально. При учете же взаимодействия перегибов между собой в процессе их термоактивируемого движения через точечные дефекты под действием переменных напряжений необходимо иметь в виду, вообще говоря, коллективный характер этого движения, приводящий к формированию некоторого спектра независимых релаксационных мод с разными характеристиками. Те моды, которые в большей степени отвечают коллективному движению перегибов, естественно, будут характеризоваться более низким частотным фактором, приближающимся к характерным частотам колебаний дислокационных струн S/L , где L — среднее расстояние между точечными дефектами на дислокациях, а S имеет порядок скорости звука в кристалле. Что же касается энергии активации низкочастотных мод, то ее более низкие значения объясняются все тем же взаимодействием геометрических перегибов, облегчающим из-за статистически независимого характера действующих на них флуктуационных сил термоактивируемое преодоление дислокациями точечных дефектов.

Литература

- [1] Дрожжин А. И., Антипов С. А. // ФТТ. 1981. Т. 23. Вып. 4. С. 1188—1189.
- [2] Антипов С. А., Дрожжин А. И., Рошупкин А. М. // ФТТ. 1985. Т. 27. Вып. 7. С. 2091—2094.
- [3] Антипов С. А., Дрожжин А. И., Мишин И. В., Рошупкин А. М. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 12. С. 2382—2384.
- [4] Дунаев А. И., Татаренков А. Ф., Бубнов Л. И., Федоров Ю. П. // Физикохимия полупроводникового материаловедения. Воронеж, 1978. С. 82—89.
- [5] Мишин И. В., Дрожжин А. И., Антипов С. А. // Заводская лаборатория. 1986. Т. 52. № 8. С. 77—79.
- [6] Баробаш Р. И., Кривоглаз М. А., Рябошапка К. Г. // ФММ. 1976. Т. 41. № 1. С. 33—44.

- [7] Антипов С. А., Дрожжин А. И., Рошупкин А. М. Релаксационные явления в нитевидных кристаллах полупроводников. Воронеж, 1987. 190 с.
- [8] Aseev A. L., Golobokov Ju. N., Stenin S. I. // Phys. Stat. Sol. (a). 1975. Vol. 28. N 1. P. 355—364.
- [9] АLEXIN В. П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. М.: Наука, 1983. 280 с.
- [10] Антипов С. А., Беляевский В. И., Дрожжин А. И. // ФТТ. 1982. Т. 24. Вып. 11. С. 3268—3272.
- [11] Дрожжин А. И., Сидельников И. В., Постников В. С. // ФТТ. 1975. Т. 17. Вып. 8. С. 2417—2419.
- [12] Дрожжин А. И., Антипов С. А. // Внутреннее трение в металлах, полупроводниках, диэлектриках и ферромагнетиках. М.: Наука, 1978. С. 106—110.
- [13] Аммер С. А., Дрожжин А. И., Москаленко А. Г. // Изв. вузов. Физика. 1974. № 9. С. 87—90.
- [14] Никитенко В. Н. // Динамика дислокаций. Киев: Наукова думка, 1975. С. 7—36.
- [15] George A., Escaravage C., Champier G., Schröter W. // Phys. Stat. Sol. (b). 1972. Vol. 53. P. 483—496.
- [16] Brailsford A. D. // Phys. Rew. 1961. Vol. 122. N 3. P. 780—799.
- [17] Кротер Р. Ф., Khiznichenko L. P. // Phys. Stat. Sol. 1967. Vol. 21. N 2. P. 811—818.
- [18] Антипов С. А., Дрожжин А. И., Рошупкин А. М. // ФТТ. 1983. Т. 25. Вып. 5. С. 1392—1396.
- [19] Гранато А., Люкке К. // Ультразвуковые методы исследования дислокаций. М.: ИЛ, 1963. С. 27—57.
- [20] Альшиц В. И., Инденбом В. Л. // Динамика дислокаций. Киев: Наукова думка, 1975. С. 232—275.
- [21] Новик А., Берри Б. Релаксационные явления в кристаллах. М.: Атомиздат, 1975. 472 с.

Воронежский
политехнический институт

Поступило в Редакцию
2 октября 1987 г.
В окончательной редакции
25 февраля 1988 г.