

ДИНАМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОНОКРИСТАЛЛОВ СИСТЕМЫ Si-Ge

Г.Ш. Дарсавелидзе, Г.В. Бокучава, Г.Г. Чубинидзе, Г.Н. Арчуадзе, И.Р. Курашвили
Сухумский физико-технический институт им. И.Н. Векуа, Тбилиси, Грузия

E-mail: sipt@sipt.org;

Б.М. Широков

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

E-mail: shirokov@kipt.kharkov.ua

Изучены электрофизические и динамические механические характеристики монокристаллических образцов Si-Ge. На основе результатов измерений амплитудной зависимости внутреннего трения и модуля сдвига определены критические амплитудные деформации отрыва сегментов дислокаций от точечных центров закрепления и динамические пределы упругости в условиях крутильных колебаний монокристаллов Si, Ge, $\text{Si}_{0,98}\text{Ge}_{0,02}$ и $\text{Ge}_{0,98}\text{Si}_{0,02}$.

Сплавы системы Si-Ge являются одними из основных материалов современного полупроводникового приборостроения. В настоящее время для решения ряда важных прикладных задач электроники и оптоэлектроники ведутся интенсивные научно-технологические работы по получению массивных образцов и эпитаксиальных структур Si-Ge. Наличие полной взаимной растворимости компонентов Si и Ge позволяет с изменением их концентрации плавно изменять ширину запрещенной зоны, электрофизические и структурно-чувствительные физико-механические характеристики твердых растворов Si-Ge. Это обстоятельство расширяет возможности создания на базе Si-Ge приборов с заданными техническими характеристиками.

В работе приводятся результаты исследования микроструктуры, электрофизических и динамических механических характеристик массивных монокристаллов Ge, Si, $\text{Si}_{0,98}\text{Ge}_{0,02}$ и $\text{Ge}_{0,98}\text{Si}_{0,02}$. Образцы диаметром 25...30 мм выращены методом Чохральского вдоль направления [111]. Структурные и физические характеристики исследуемых образцов определены методами оптической микроскопии, эффекта Холла в постоянном магнитном поле, регистрации частоты

и амплитуды крутильных колебаний в диапазонах частот 0,5...5,0 Гц и амплитудной деформации $1 \cdot 10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-3}$. Характеристики микроструктуры и электрофизических свойств образцов Si-Ge с заданными размерами определены при комнатной температуре. Значения модуля сдвига определены методом сравнения частот колебаний исследуемых и эталонного (ванадиевого) образцов с идентичными размерами (0,5 x 0,5 x (10...15) мм). Амплитудная зависимость динамических механических характеристик образцов на основе Ge исследована при 550 °С, а образцов Si и $\text{Si}_{0,98}\text{Ge}_{0,02}$ – в области температур 720...750 °С, при которых проявляется микропластичность в реальной структуре указанных образцов.

Изучение фигур травления с помощью оптического микроскопа системы NMM-800RF/TRF показало однородное распределение дислокаций на плоскостях (111) монокристаллических образцов Si и Ge. В микроструктуре образцов $\text{Si}_{0,98}\text{Ge}_{0,02}$ и $\text{Ge}_{0,98}\text{Si}_{0,02}$ наблюдаются неоднородность распределения и резкое увеличение плотности дислокаций. В периферийной части монокристаллов часто имеются скопления дислокаций. Средние значения плотности дислокации приведены в таблице.

Физико-механические характеристики образцов Si-Ge

| Образцы Si-Ge | Концентрация носителей тока, см^{-3} | Подвижность, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ | Плотность дислокаций, см^{-2} | Модуль сдвига, $\text{кГ}/\text{мм}^2$ | Амплитудная зависимость внутреннего трения для образцов Si | Амплитудная зависимость внутреннего трения для образцов $\text{Si}_{0,98}\text{Ge}_{0,02}$ | Предел упругости для образцов Si, $\text{кГ}/\text{мм}^2$ | Предел упругости для образцов $\text{Si}_{0,98}\text{Ge}_{0,02}$, $\text{кГ}/\text{мм}^2$ |
|--|---|--|--|--|--|--|---|--|
| Si р-типа | $1 \cdot 10^{15}$ | 900 | $7 \cdot 10^3$ | 4850 | $5 \cdot 10^{-4}$ | $7 \cdot 10^{-3}$ | 2,4 | 32,3 |
| $\text{Si}_{0,98}\text{Ge}_{0,02}$ р-типа | $2 \cdot 10^{15}$ | 980 | $2 \cdot 10^4$ | 4700 | $2 \cdot 10^{-4}$ | $5 \cdot 10^{-3}$ | 0,94 | 23,5 |
| Ge п-типа | $5 \cdot 10^{15}$ | 1300 | $5 \cdot 10^3$ | 4250 | $5 \cdot 10^{-5}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | 0,20 | 2,1 |
| $\text{Ge}_{0,98}\text{Si}_{0,02}$ п-типа | $3 \cdot 10^{15}$ | 1150 | $2 \cdot 10^4$ | 4400 | $1 \cdot 10^{-4}$ | $1 \cdot 10^{-3}$ | 0,44 | 4,4 |

Согласно холловским измерениям электрофизических характеристик образцов Ge и $\text{Ge}_{0,98}\text{Si}_{0,02}$ вдоль оси роста монокристаллов [111] значения подвижности носителей тока понижены, что связано с их рассеянием на дислокациях. В сплаве $\text{Si}_{0,98}\text{Ge}_{0,02}$, наоборот, наблюдается тенденция увеличения подвижности дырок. Предполагается, что оно связано с понижением концентрации кислорода в кристаллической структуре исследуемого сплава Si-Ge.

Амплитудные зависимости внутреннего трения Q^{-1} и относительной величины модуля сдвига G/G_0 монокристаллических образцов Si-Ge в области комнатной температуры характеризуются одной критической точкой амплитудной деформации. Она разделяет друг от друга две области весьма слабого и резкого линейного возрастания Q^{-1} и соответственно уменьшения G/G_0 . Критическое значение амплитудной деформации понижается введением германия в решетку кремния и, наоборот, возрастает в случае легирования германия кремнием.

Из таблицы видно, что легирование германием оказывает разупрочняющее влияние на кристаллическую структуру кремния, а введение кремния в кристаллическую структуру германия, наоборот, способствует упрочнению. Отмеченные особенности обнаруживаются в возрастании и понижении абсолютных значений динамического модуля сдвига указанных сплавов по сравнению с нелегированными образцами Si или Ge. Аналогичные эффекты обнаруживались в области повышенных температур в n- и p-типах образцов Ge-Si [1].

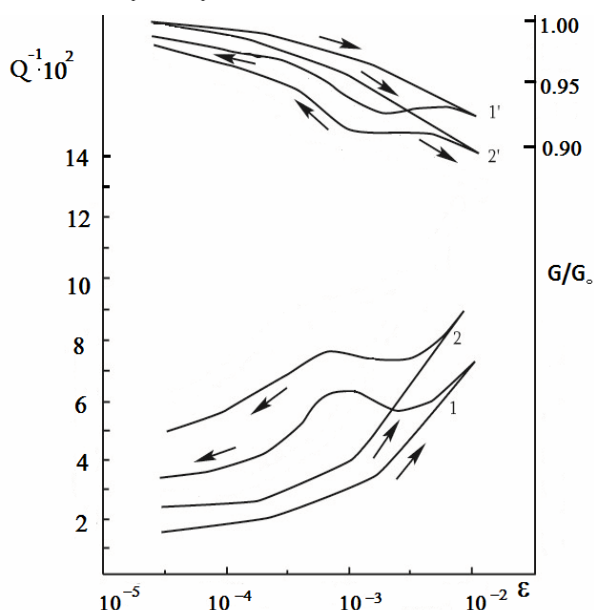
При комнатной температуре и вакууме $\sim 10^{-3}$ Па измерялись частоты крутильных колебаний исследуемых и эталонного (йодидного ванадия) образцов с идентичными размерами, закрепленных на оси прямого маятника в установке внутреннего трения. Абсолютные значения модуля сдвига рассчитаны из известного соотношения:

$G = G_0 \frac{f^2}{f_0^2}$, где G_0 – и f_0 – модуль сдвига и частота колебаний эталонного образца.

На рисунке показаны результаты исследования амплитудной зависимости внутреннего трения и относительной величины модуля сдвига монокристаллических образцов Si и $\text{Si}_{0,98}\text{Ge}_{0,02}$.

При повышенных температурах кривые $Q^{-1}(\varepsilon)$ монокристаллов Si-Ge характеризуются многостадийным изменением (см. рисунок). Оно проявляется при наличии двух критических значений амплитудной деформации, при которых изменяются механизмы рассеяния энергии колебаний. Критические значения амплитудной деформации в монокристаллических образцах возрастают после отжига образцов при температурах 700°C в течение 10 ч. Высокоамплитудная циклическая деформация ($\varepsilon \sim 5 \cdot 10^{-3}$) образцов Si и $\text{Si}_{0,98}\text{Ge}_{0,02}$ при 700°C (число циклов – 500) приблизительно на 15 % понижает значения $\varepsilon_{\text{кр},1}$ и практически не влияет на

величину $\varepsilon_{\text{кр},2}$. Аналогичные изменения наблюдаются при 500°C в циклически деформированных образцах Ge и $\text{Ge}_{0,98}\text{Si}_{0,02}$, в результате отжига которых при той же температуре в течение 5 ч происходит слабое увеличение значений $\varepsilon_{\text{кр},1}$ и $\varepsilon_{\text{кр},2}$.



Амплитудная зависимость внутреннего трения (1, 2) и относительной величины модуля сдвига (1', 2') монокристаллических образцов Si (1, 1') и $\text{Si}_{0,98}\text{Ge}_{0,02}$ (2, 2')

В широкой области амплитудных значений колебательной деформации во всех исследованных образцах Si-Ge модуль сдвига изменяется сложным образом. Оценены критические значения амплитуд деформации, разделяющие друг от друга области с различным характером изменения модуля сдвига. Эксперименты показали, что в области амплитудных деформаций $\varepsilon_{\text{кр},1} < \varepsilon \leq \varepsilon_{\text{кр},2}$ на кривой модуля сдвига образуется замкнутая петля гистерезиса, показывающая проявление обратимого процесса открепления–закрепления сегментов дислокаций, взаимодействующих с точечными дефектами. В области амплитудных деформаций $\varepsilon > \varepsilon_{\text{кр},2}$ образуется открытая петля гистерезиса, свидетельствующая согласно теории [2] о проявлении микропластичности в образцах Si-Ge.

Значения динамических пределов упругости образцов Si-Ge вычислены как произведение величины модуля сдвига и критических амплитуд деформации. Предполагается, что наблюдаемое значительное увеличение динамического модуля сдвига и характеристик дислокационной структуры монокристаллического $\text{Ge}_{0,98}\text{Si}_{0,02}$ обуславливается процессами твердорастворного упрочнения структуры и торможения дислокаций примесной атмосферой типа Коттрелла.

Таким образом, изменением концентрации компонентов Si и Ge возможно регулирование характеристик дислокационной структуры и механических свойств сплавов системы Si-Ge.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kurashvili, E. Sanaia, G. Bokuchava, G. Darsavelidze. *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*. 2006, v. 4, N 1, p. 38-41.

2. A. Pushkar. *Internal Friction in Metals and Alloys*. London, 2005, 640 p.

Статья поступила в редакцию 06.09.2012 г.

ДИНАМІЧНІ МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОНОКРИСТАЛІВ СИСТЕМИ Si-Ge

Г.Ш. Дарсавелідзе, Г.В. Бокучава, Г.Г. Чубінідзе, Г.Н. Арчуадзе, І.Р. Курашвілі, Б.М. Широков

Вивчено електрофізичні та динамічні механічні характеристики монокристалічних зразків Si-Ge. На основі результатів вимірів амплітудної залежності внутрішнього тертя й модуля зрушення визначені критичні амплітудні деформації відриву сегментів дислокацій від крапкових центрів закріплення й динамічні межі пружності в умовах крутильних коливань монокристалів Si, Ge, $\text{Si}_{0,98}\text{Ge}_{0,02}$ та $\text{Ge}_{0,98}\text{Si}_{0,02}$.

DYNAMIC MECHANICAL CHARACTERISTICS OF Si-Ge SYSTEMS MONOCRYSTALS

G.Sh. Darsavelidze, G.B. Bokuchava, G.G. Chubinidze, G.N. Archuadze, I.R. Kurashvili, B.M. Shirokov

Electrophysical and dynamic mechanical characteristics of monocrystalline specimens of Si-Ge were investigated. Critical strain amplitude of breakaway of segments of dislocations from pinning centers and elasticity limits of Si, Ge, $\text{Si}_{0,98}\text{Ge}_{0,02}$ and $\text{Ge}_{0,98}\text{Si}_{0,02}$ monocrystals in conditions of torsion oscillations were determined on the basis of results of measurements of internal friction and shear modulus amplitude dependences.