

ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 543.42:54.16

АНИЗОТРОПИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И НЕОДНОРОДНОСТЬ ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛОВ ГЕРМАНИЯ

© 2008 г. Е. Н. Рошак; П. С. Ширшнев; А. К. Пржевуский, доктор физ.-мат. наук

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий,
механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: redshuhart@inbox.ru

Пластическая деформация кристаллов германия путем сжатия вдоль симметричного направления $\langle 111 \rangle$ приводит к двулучепреломлению для света, распространяющегося в любом направлении. При этом кристалл разбивается на области размером в несколько мм с различающимися ориентацией оптической индикатрисы и двулучепреломлением.

Коды OCIS: 160.4760.

Поступила в редакцию 28.03.2008.

Введение

Исследования структуры и свойств пластически деформированных кристаллов с одной стороны ставят ряд чрезвычайно сложных фундаментальных проблем, с другой стороны актуальны с точки зрения развития новых оптических технологий [1–6]. Исследования, представленные в настоящей статье, являются продолжением цикла работ по влиянию пластической деформации на оптические свойства кристаллов германия. В предыдущих работах изучалось влияние деформации на спектральное пропускание [7–9]. В настоящем исследовании изучались анизотропия и неоднородность оптических свойств, наведенные пластической деформацией.

Исходно кристаллы германия обладают кубической симметрией и, следовательно, являются оптически изотропными. Хорошо известно, что при упругой деформации кристаллов одноосным сжатием их симметрия понижается [10]. Причем симметрия упруго деформированного кристалла зависит от направления сжатия. В частности, при сжатии вдоль оси симметрии 3-го или 4-го порядка, эта ось сохраняется и у деформированного кристалла. Кристалл становится оптически одноосным.

Представляло интерес выяснить, в какой мере нарушается симметрия кристаллов германия при их пластической деформации вдоль оси симметрии высокого порядка: распространяются ли закономерности упругой деформации на пластическую, трансформируется ли кубический кристалл в одноосный.

Чтобы проверить это предположение, исследовалось пропускание вдоль направления $\langle 111 \rangle$ пластически деформированных по этому направлению образцов германия при их расположении между скрещенных поляроидов.

Методика экспериментов

В работе исследовались пластически деформированные кристаллы германия с разной степенью деформации 4,5–13%. Деформация проводилась путем сжатия вдоль направления $\langle 111 \rangle$ при $T = 650$ °C по методике, описанной в [8]. Германиевые образцы после деформации представляли собой плоскопараллельные диски разных диаметров 15–30 мм и толщиной примерно 8 мм. Для оптического исследования поверхности дисков шлифовались до полного удаления трещиноватого слоя, а затем полировались.

Для исследования анизотропии пропускания деформированных кристаллов германия была собрана специальная установка (рис. 1). В качестве источника излучения использовался полупроводниковый лазер мощностью излучения 10 мВт и длиной волны излучения 3,4 мкм. В качестве приемника – точечный фотодиод размером принимающей площадки $1,5 \times 1,5$ мм. В качестве поляризатора и анализатора были выбраны фторопластовые поляроиды-решетки, обеспечивающие хорошую поляризацию на необходимой длине волны. Для исследования отдельных участков образца перед ним располагалась диафрагма диаметром 2,6 мм, что

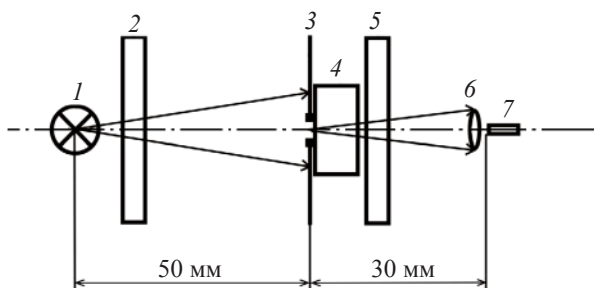


Рис. 1. Схема установки: 1 – полупроводниковый лазер, 2 – поляризатор, 3 – диафрагма, 4 – исследуемый образец, 5 – анализатор, 6 – собирающая линза, 7 – фотодиод.

обеспечивало угловую расходимость пучка, проходящего через образец, около 5° .

Сигнал фотоприемника преобразовывался в электрический сигнал, который усиливался и обрабатывался на ЭВМ по специальной программе. Данные, показывающие отношение интенсивности входящего излучения к интенсивности излучения на выходе, выводились в условных единицах в цифровом виде.

Установка позволяла вращать образец вокруг оси, проходящей через центр зондирующего пучка света, и в перпендикулярной плоскости образца. После выбора для исследования точки поверхности на конкретном образце измерялась зависимость интенсивности света I , прошедшего через установку, в зависимости от угла поворота образца α_1 , который являлся основным варьируемым параметром.

Результаты и их обсуждение

Основная часть измерений проводилась при скрещенных поляроидах, когда угол между плоскостями поляризации поляризатора и анализатора был равен 90° . В этих условиях пропускание системы поляроидов света с длиной волны $3,4 \text{ мкм}$ составляло менее 2% от значения, получаемого в случае параллельной ориентации поляроидов. При расположении между поляроидами недеформированных кристаллов германия просветления не наблюдалось. Фактически сигнал несколько уменьшался по сравнению с сигналом установки без образца и с трудом мог быть выделен на фоне шумов. Таким образом, у исходных образцов двулучепреломление не наблюдалось.

При помещении в установку пластически деформированного кристалла германия установка регистрировала сигнал, который зависел, во-первых, от образца, во-вторых, от выбранной на нем для зон-

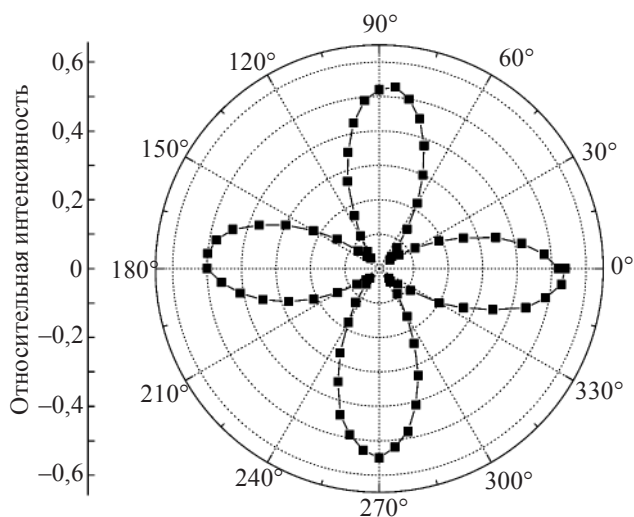


Рис. 2. Пример измеренной зависимости интенсивности сигнала от угла поворота образца.

дирования точки и, в-третьих, от угла поворота образца относительно поляроидов установки. Примеры типичных результатов представлены на рис. 2.

При полном повороте на 360° всегда наблюдалось четыре максимума сигнала. Углы между соседними максимумами равнялись $\pi/2$.

Таким образом, в отличие от случая упругой деформации пластическая деформация при сжатии по оси симметрии приводит к нарушению этой симметрии. Свет, распространяющийся вдоль направления пластической деформации, испытывает двулучепреломление. Наблюдающиеся картины двулучепреломления во многом схожи с теми, которые имеют место при распространении света через фазовую пластинку. Однако имеются и существенные отличия.

Во-первых, только в исключительных случаях поворотом образца можно было уменьшить проходящий сигнал до уровня шума – восстановить скрещенность поляроидов.

Во-вторых, зависимости сигнала от углов поворота почти всегда отличались от функции $\sin^2(2\alpha)$, описывающей зависимость для простой фазовой пластинки.

Наблюдавшиеся эффекты нельзя приписать двулучепреломлению остаточных термонапряжений, возникающих из-за нагрева и охлаждения, используемых при пластической деформации образцов. Нагрев и охлаждение образцов без деформации с тем же режимом, как в случае деформации, не приводили к двулучепреломлению.

Характер анизотропии менялся при переходе от одного участка образца к другому. На это указыва-

ют отличия угловых зависимостей интенсивности сигнала (рис. 3) для разных участков образца. Четырехлепестковые фигуры, описывающие зависимости интенсивности сигнала от углов поворота, имеют разный вид и амплитуду.

Наблюдавшиеся явления можно объяснить исходя из представлений о природе пластической деформации. Общеизвестно, что пластическая деформация осуществляется путем скольжения по определенным кристаллическим плоскостям $\{lmn\}$ в определенных кристаллических направлениях $\langle khg \rangle$. Совокупность конкретных значений этих характеристик определяет “систему скольжения”. Симметрия кристалла приводит к тому, что для каждого кристалла возможно несколько кристаллографически эквивалентных систем скольжения. В случае германия скольжение происходит по 4-м плоскостям $\{111\}$ в 6-ти направлениях типа $\langle 1\bar{1}0 \rangle$. Из 24 получающихся таким образом систем скольжения только 5 являются независимыми [11].

Вероятность реализации скольжения по конкретной системе зависит от фактора Шмидта m , который выражается в виде произведения

$$m = \cos(\chi)\cos(\lambda), \quad (1)$$

где χ и λ – углы между направлением сжатия и соответственно нормалью к плоскости скольжения и направлением скольжения [11].

Фактор Шмидта определяет величину скальвающего напряжения для конкретной системы скольже-

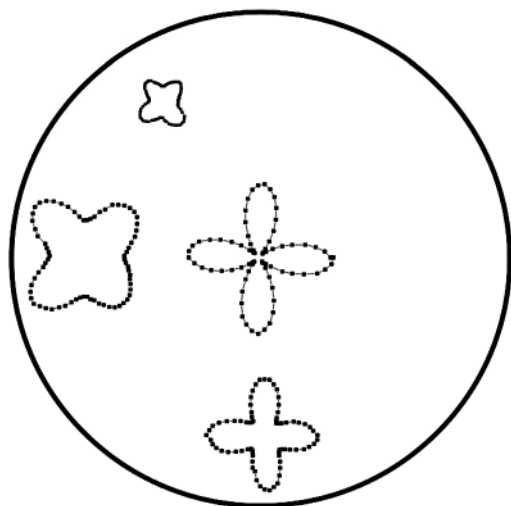


Рис. 3. Четыре кривых зависимости интенсивности сигнала от угла поворота в полярных координатах, полученные в результате измерений для разных точек одного образца. Начала координат расположены в точках измерения. Сама фигура представляет собой зависимость интенсивности от угла поворота.

ния. Выполнить условия одноосного сжатия так, чтобы превалировало скальвающее напряжение для одной системы, непросто. Обычно в одинаковых условиях оказываются несколько систем скольжения.

В условиях проводившегося эксперимента скольжение могло происходить по нескольким системам, для которых фактор Шмидта отличен от нуля и одинаков.

Представляется естественным следующий сценарий развития деформации при увеличении деформации кристаллов германия по симметричному направлению – оси третьего или четвертого порядка.

В упругой области кристалл трансформируется из кубического в одноосный, приобретая симметрию, соответствующую симметрии направления сжатия. При увеличении сжатия и появления пластической деформации ее анизотропия будет определяться двумя факторами: направлением внешнего сжатия (фактором Шмидта) и ориентацией включившихся систем скольжения, которая, в свою очередь, зависит от направления сжатия.

Непосредственное наблюдение полос скольжения в кристаллах германия говорит о том, что их направление обычно неодинаково для различных участков кристалла, что свидетельствует о скольжении по разным системам [3, 5, 13, 14]. В основном это системы одного семейства, но при сильной деформации возможно подключение и других семейств.

В результате наведенная деформацией анизотропная часть оптической индикатрисы и характер двулучепреломления должны отличаться для разных участков образца.

Модель

Для качественной интерпретации полученных экспериментальных данных авторы использовали простейший вариант модели неоднородного кристалла. Считалось, что пластически деформированный кристалл ведет себя как две плотно прилегающие параллельные кристаллические пластинки, вырезанные из анизотропного кристалла. Свет распространяется перпендикулярно плоскостям пластинок. Таким образом, модель имеет четыре параметра: два фазовых сдвига δ_1, δ_2 , создаваемые каждой из пластинок, и два угла поворота главного направления пластинок относительно общей системы координат α_1, α_2 – углы ориентации кристаллических пластинок относительно направления поляризации входного поляроида.

С помощью формализма Мюллера [14] было получено следующее выражение для интенсивности света, прошедшего через модель:

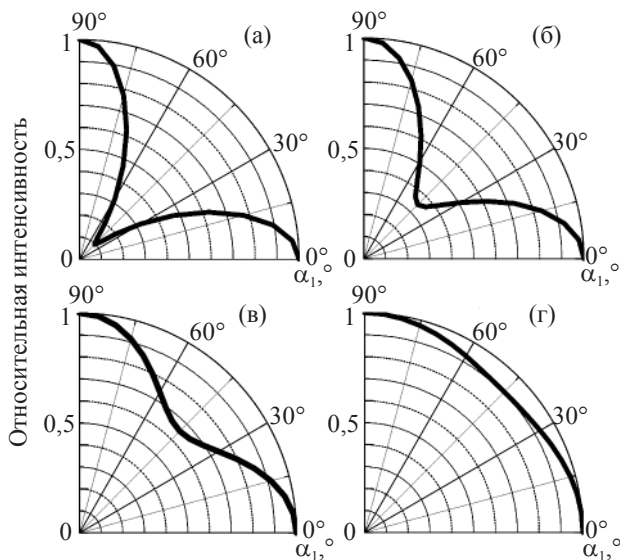


Рис. 4. Рассчитанные зависимости интенсивности от угла поворота α_1 при изменяющейся фазовой задержке первой по ходу прохождения лучей пластины. $\beta = 45^\circ$, $\delta_2 = \pi$. а – $\delta_1 = 1/5\pi$, б – $\delta_1 = 2/5\pi$, в – $\delta_1 = 3/5\pi$; г – $\delta_1 = 4/5\pi$.

$$I = 0,5 \left\{ 1 - \left[\sin^2(\delta_1/2) \cos(4\alpha_1) + \cos^2(\delta_1/2) \right] \times \right. \\ \times \left[\sin^2(\delta_2/2) \cos(4\alpha_2) + \cos^2(\delta_2/2) \right] - \\ - \sin(4\alpha_1) \sin^2(\delta_1/2) \sin(4\alpha_2) \sin^2(\delta_2/2) + \\ \left. + \sin(2\alpha_1) \sin(\delta_1) \sin(2\alpha_2) \sin(\delta_2) \right\}. \quad (2)$$

Формула описывает интенсивность света, проходящего через систему как функцию 4-х параметров. При такой записи хорошо видна симметрия формулы относительно переменных δ_1 , δ_2 и α_1 , α_2 . Полученное выражение инвариантно по отношению к такому повороту на целое число $\pi/2$. Поэтому рассчитанные в цилиндрической системе координат зависимости приведены только для интервала от 0 до $\pi/2$.

В условиях эксперимента соблюдалось соотношение $\alpha_2 - \alpha_1 = \text{const}$. В этом случае измерявшиеся экспериментально зависимости сигналов от углов поворота образца могут рассматриваться как функции одного угла α_1 в формуле (2).

Примеры результатов расчетов приведены на рис. 4 и 5. Они позволяют описать все экспериментально полученные зависимости интенсивности от угла поворота образца. Таким образом, весьма простая модель из двух фазовых пластинок позволяет на качественном уровне объяснить все наблюдавшиеся варианты экспериментальных зависимостей.

Это позволяет предполагать, что типичный размер гомогенных областей пластически деформиро-

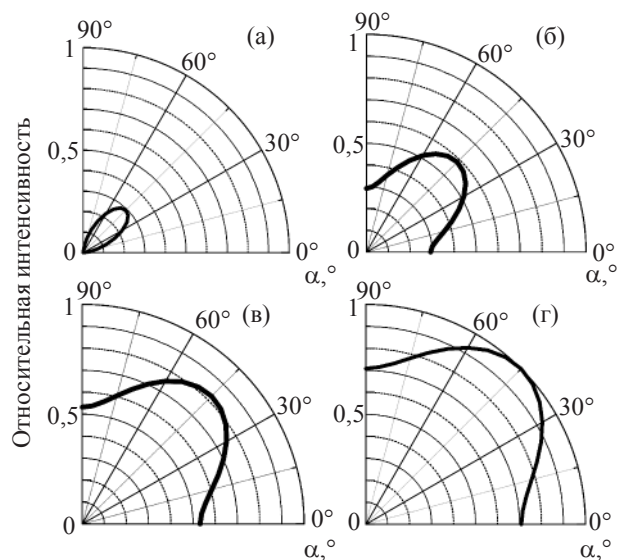


Рис. 5. Рассчитанные зависимости интенсивности от угла поворота α при изменяющемся угле разориентации пластинок. $\delta_1 = \pi$ рад, $\delta_2 = 2$ рад. а – $\beta = 0^\circ$, б – $\beta = 20^\circ$, в – $\beta = 30^\circ$, г – $\beta = 45^\circ$.

ванных кристаллов германия в данных экспериментах составлял несколько мм.

Вопрос о размерах однородных участков внутри пластически деформированных кристаллов в настоящее время активно обсуждается в литературе [1–5].

Максимальная величина двулучепреломления наблюдалась в центре образца, данные для которого изображены на рисунке. В этой точке наблюдается практически полное “просветление”, и модель двух кристаллических анизотропных пластинок переходит в модель одной пластинки. При этом двулучепреломление составляет 760 нм/см.

Выводы

В результате пластической деформации образцы кристаллов германия становятся двулучепреломляющими для света, распространяющегося в любом направлении. В частности, в отличие от упругой деформации двулучепреломление наблюдается для света, распространяющегося вдоль направления сжатия, когда это направление совпадает с осью симметрии третьего порядка.

Двулучепреломление и ориентация оптической индикатрисы меняются при переходе от одного участка образца к другому. Анализ показывает, что наблюдаемые зависимости могут быть количественно описаны на основе модели, в которой пластически деформированный кристалл германия ими-

тируется в виде последовательности двух кристаллических фазовых пластинок с варьируемым углом между их направлениями.

Наблюдавшаяся в настоящей работе неоднородность оптических свойств пластически деформированных кристаллов германия согласуется с пространственной гетерогенностью других свойств, исследовавшихся в работах [1–5, 13, 14]

В заключении авторы выражают благодарность коллективу компании “Пром-Инжиниринг”, в частности Дмитрию Викторовичу Пшонкину и Александру Владимировичу Швецу, за предоставленную измерительную установку и содействие.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов Л.Е., Старенченко В.А., Колупаева С.Н. Неустойчивости пластической деформации кристаллов и формирование дислокационных дефектных структур // Математическое моделирование систем и процессов. 1995. № 3. С. 76–87.
2. Cailletaud G., Diard O., Feyel F., Forest S. Computational Crystal Plasticity: From Single Crystal to Homogenized Polycrystals // Technische Mechanik. 2003. Band 23. Heft 2–4. P. 130–145.
3. Alexandr H. Plastic deformation of germanium single crystals // Z. Metallk. 1961. V. 52. P. 344–352.
4. Nyilas K., Dupas C., Krum T., Zsoldos L., Ungár T., Martin J.L. Dislocation structure and mechanical behavior of Ge single crystals deformed by compression // Mater. Sci. Eng. A. 2004. P. 25–28.
5. Zhang Y.W., Wang T.C., Liang N.G. The inhomogeneity of plastic deformation in ductile single crystals // Modeling Simul. Mater. Sci. Eng. 1994. V. 2. P. 1171–1193.
6. Афанасьев И.И., Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Рыжиков Э.Н., Адрианова Л.К. Способ получения оптических линз // Патент РФ 1773956. 1993.
7. Маколкина Е.Н. Влияние высокотемпературной термообработки на спектр поглощения кристаллов германия // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского университета информационных технологий, механики и оптики. 2005. № 18. С. 198–202.
8. Маколкина Е.Н., Пржевуский А.К. Влияние пластической деформации на спектр кристаллов германия // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 2. С. 74–77.
9. Рошак Е.Н., Ширинев П.С., Пржевуский А.К. Влияние пластической деформации на межзонные и внутризонные переходы в кристаллах германия // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 10. С. 64–67.
10. Walton A.K., Everett C.R. Free carrier piezoabsorption in n-type germanium // Solid State communication. 1967. V. 5. P. 275–278.
11. Урусовская А.А. Механические свойства кристаллов // Глава 2. Современная кристаллография. Т. 4. Физические свойства кристаллов. М.: Наука, 1981. С. 47–152.
12. Patel J.R., Alexander B.H. Plastic deformation of germanium in compression // Acta Metalurgica. 1956. V. 4. P. 385–395.
13. Kojima K., Sumino K. Development of dislocation structure and slip band distribution in germanium crystals // J. of Phys. Soc. of Jpn. 1971. V. 31. № 1. P. 171–178.
14. Шерклифф У. Поляризованный свет. М.: Мир, 1965. 264 с.