

PACS: 81.40.Ef, 62.20.Fe

В.А. Надточий, Н.К. Нечволод, Д.С. Москаль

## УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОПЛАСТИЧНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛОВ

Славянский государственный педагогический университет  
ул. г. Батюка, 19, г. Славянск, Донецкая область, 84116, Украина  
E-mail: sgpi@slav.dn.ua

Статья поступила в редакцию 12 декабря 2003 года

*Разработана установка, позволяющая исследовать микропластичность алмазоподобных полупроводников. При температуре 300 К это достигается снятием кривых  $\sigma$ - $\epsilon$  или  $\epsilon$ - $t$ . В интервале 77–300 К зарождение дислокаций в приповерхностных слоях кристаллов можно регистрировать по изменениям электропроводности, времени жизни носителей заряда в образцах или обратного тока полупроводниковых  $p$ - $n$ -переходов.*

В кристаллах с решеткой алмаза и сфалерита движение дислокаций затруднено и обусловлено высокими напряжениями Пайерлса–Набарро вследствие жесткости межатомных связей и строгой направленности их в пространстве. Поэтому считалось, что пластичность кристаллов с ковалентным типом связи проявляется лишь при температурах, больших  $0.5T_{\text{melt}}$ , когда размножение и движение дислокаций становятся заметными. Вместе с тем исследование низкотемпературной деформации методом индентирования [1], растяжения и сжатия кристаллов [2–5] позволили обнаружить микропластичность в этих полупроводниках в температурном интервале от 500 К вплоть до температуры жидкого азота. Обнаружено, что микропластичность возникает в тонких приповерхностных слоях, для чего требуется измерение малых деформаций порядка сотых долей микрона.

Ранее была описана конструкция установки [6], позволяющая изучать микропластичность в Ge и Si при комнатной температуре. В предлагаемом варианте новой установки достигнуто уменьшение погрешностей измерений и расширены возможности исследований: кроме обычной деформации сжатием имеются возможности облучения образцов ультразвуком, а также изучения микропластичности при более низких температурах.

Общий вид установки показан на рис. 1. На круглой плите 1 установлены две стальные опоры 2, на которых сверху крепится балка 3 с плунжерной парой 4. Нагрузка  $P$  рычагом (1:10) 5 передается через шарик на поршень 6

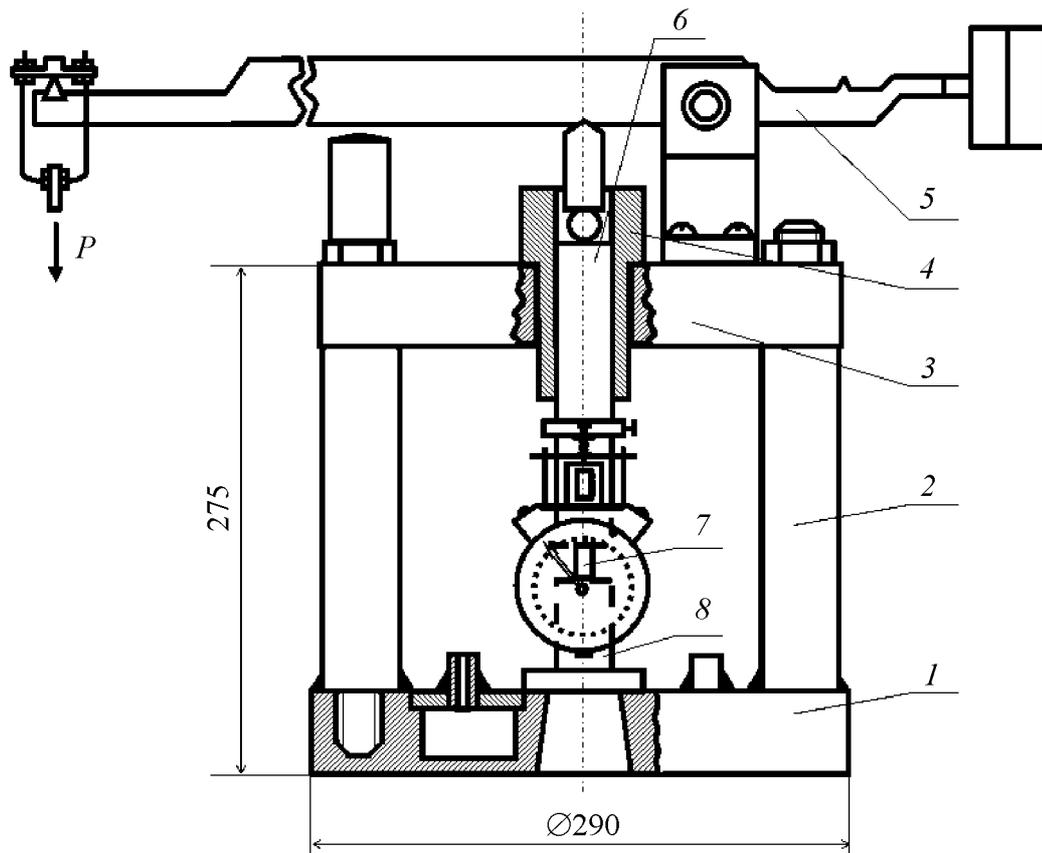


Рис. 1. Общий вид установки

плунжерной пары и затем – на образец 7, который устанавливается на нижней опоре 8. Со стороны образца в детали 6 и 8 запрессованы плоскопараллельные площадки 9 из твердого сплава ВК3-М ( $HRC \geq 91$ ), поверхности которых обработаны алмазными микропорошками, и достигнута чистота не хуже  $\nabla 12$ . В нижней плите сделана кольцевая полость, в которую через штуцеры подается проточная вода для охлаждения нижней опоры, когда испытания на сжатие образцов проводятся в интервале температур 300–500 К. На деталь 6 надевается водяной охладитель, а измеритель деформации 10 снимается. В этом режиме работы находятся зависимости электрических параметров кристаллов от давления.

В установке предусмотрено ультразвуковое облучение объектов. Для этого опора 8 снимается и через отверстие в плите 1 снизу вводится акустический излучатель, на котором устанавливается образец. Установка может работать в режимах испытаний на ползучесть, ступенчатую ползучесть и сжатие с постоянной скоростью нагружения.

Измеритель деформации (рис. 2) представляет собой оригинальную комбинацию механического и электрического дифференциального датчиков перемещения, выполненных на основе индикатора 10 часового типа. Индикатор работает в обратном обычном режиме: поворотом его оси с помощью диска 11 можно задать очень малые (в микронах) перемещения стержню 12,

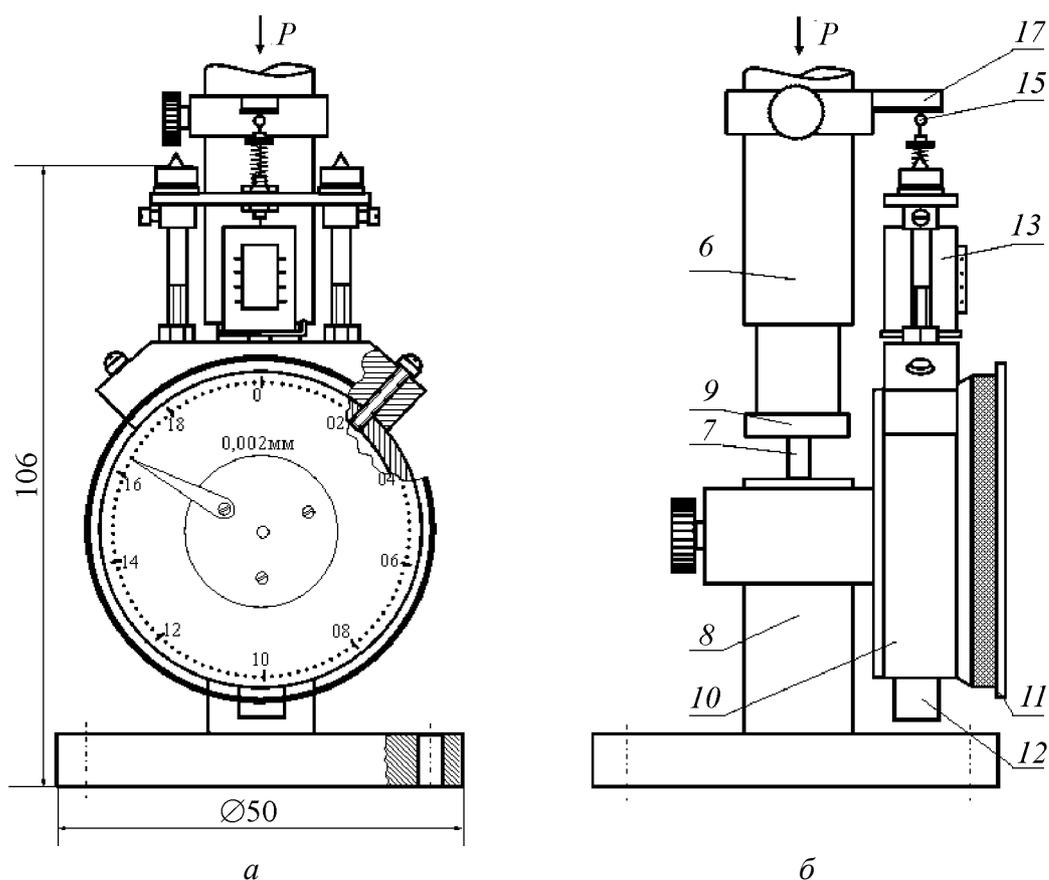


Рис. 2. Электронно-механический датчик деформации: *а* – вид прямо; *б* – вид сбоку

на котором сверху крепится катушка дифференциального датчика *13*. На ферритовый сердечник, расположенный внутри экранированной катушки, деформация передается от пластины *14* через шарик *15*. Устройство и работа электрической части схемы описаны в работе [6].

Для исследования микропластичности в интервале 77–300 К используется криостат (рис. 3,*а*). С целью облегчения доступа к образцу криостат выполнен в виде разъемной конструкции (рис. 3,*б*). Емкости для заполнения жидким азотом изготовлены из двух тонкостенных латунных цилиндров разного диаметра, разрезанных вдоль образующей. Каждый полуцилиндр *1* окружен теплоизоляцией из пенопласта *2*. После установки на днище *3* из пенопласта криостат сверху скрепляется пенопластовой крышкой *4*, а по боковой поверхности – бандажом (рис. 3,*а*). Промежуточные температуры выше 77 К создаются нагревателями *5*, выполненными из латуни. Катушки нагревателей *7* намотаны нихромовым проводом. Тепловой контакт создается между нижним нагревателем и цилиндром холодильника *1*, а верхний нагреватель имеет с холодильником зазор 1 мм. Нагружающий цилиндр *6* и нижняя опора *8* теплоизолированы прокладками *9* из полиуретана. Температура нагружающих площадок измеряется термомпарами *10*.

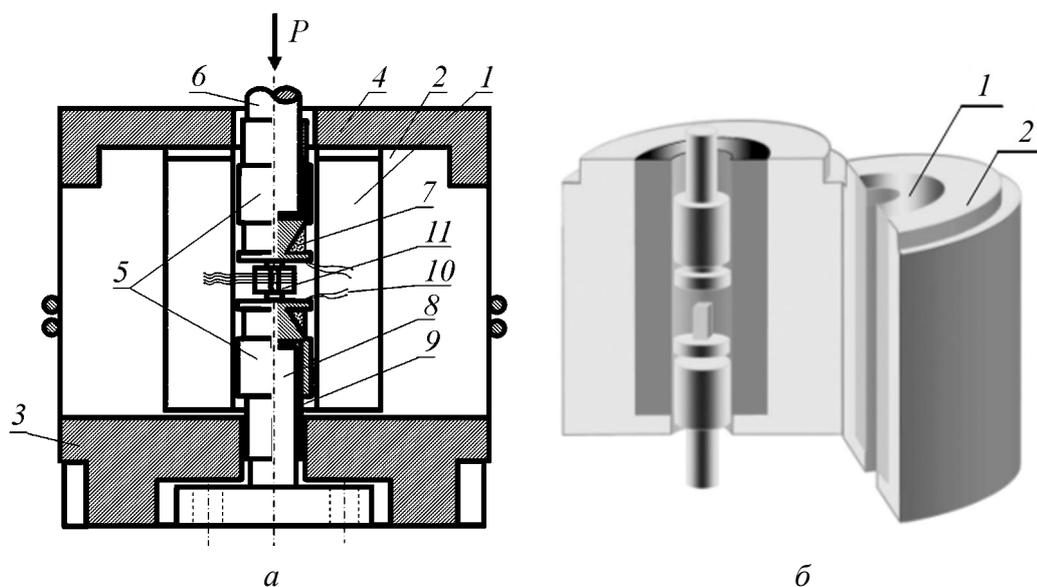


Рис. 3. Устройство криостата (а) и его общий вид в разрезе (б) в меньшем масштабе

При низких температурах зарождение дислокаций можно регистрировать по изменению электросопротивления  $\rho$  или времени жизни неравновесных носителей заряда  $\tau$  в зависимости от нагрузки  $\sigma$ . Кроме того, зарождение дислокаций обнаруживается по измерению обратного тока  $I_{\text{rev}}$  деформируемых  $p$ - $n$ -переходов. Все три параметра  $\rho$ ,  $\tau$  и  $I_{\text{rev}}$  являются структурно-чувствительными. Для измерений  $\rho$  используется четырехзондовая головка 11, (рис. 3,а). Можно выбрать такое направление сжатия кристалла, чтобы изменение  $\rho$  за счет тензорезистивного эффекта было незначительным. Для  $n$ -Si это направления типа  $\langle 111 \rangle$ , а для  $n$ -Ge –  $\langle 100 \rangle$  [7]. Время жизни неосновных носителей заряда измерялось методом модуляции проводимости в точечном контакте с полупроводником [8].

Достоинство метода – его локальность, что дает возможность по значениям  $\tau$  в различных точках на поверхности кристалла составлять топограмму и оценивать распределение плотности дислокаций [9]. Исследования электрических свойств Si, деформированного на описанной установке при низких температурах, опубликованы в [4], а деформационные зависимости  $\sigma$ - $\epsilon$ ,  $\epsilon$ - $t$  для кристаллов Si, Ge, GaAs, InAs – в работе [10].

1. В.И. Трефилов, Ю.В. Мильман, ДАН СССР **153**, 824 (1963).
2. В.В. Господаревский, В.П. Алехин, А.В. Сандулова, М.Х. Шоршоров, Сплавы редких металлов с особыми физико-химическими свойствами, Наука, Москва (1975).
3. В.П. Алехин, Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов, Наука, Москва (1983).
4. В.А. Надточий, Н.К. Нечволод, Д.Г. Сущенко, ФТВД **11**, № 1, 104 (2001).
5. В.П. Алехин, В.А. Надточий, Н.К. Нечволод, ФХОМ № 5, 112 (1974).

6. В.А. Надточий, Н.К. Нечволод, А.П. Тихонов, Заводская лаборатория № 1, 112 (1974).
7. К. Зеегер, Физика полупроводников, Мир, Москва (1977).
8. Л.П. Павлов, Методы измерения параметров полупроводниковых материалов, Высшая школа, Москва (1987).
9. В.А. Надточий, Н.Н. Голоденко, Д.Г. Сущенко, Вісник Донецького університету. Серія А № 1 (2000).
10. V. Nadtochiy, N. Nechvolod, N. Golodenko, Functional Materials **10**, № 4 (2003).

*V.A. Nadtochiy, N.K. Nechvolod, D.S. Moscal*

### ARRANGEMENT FOR INVESTIGATION OF SEMICONDUCTOR SINGLE CRYSTAL MICROPLASTICITY

An arrangement allowing to investigate microplasticity of diamond-like semiconductors was designed. At the temperature 300 K this is attained by taking off  $\sigma$ - $\varepsilon$  or  $\varepsilon$ - $t$  curves. In the interval 77–300 K, origin of dislocations in the single crystal subsurface layers can be registered according to changes of electric conductivity, charge carrier life-time in the samples or semiconductor  $p$ - $n$  junction reverse current.

**Fig. 1.** General view of the equipment

**Fig. 2.** Electronic-mechanical deformation sensor:  $a$  – front view;  $\bar{b}$  – side view

**Fig. 3.** Arrangement of the cryostat ( $a$ ) and its general view in section ( $\bar{b}$ ) on a smaller scale