

Влияние режима формирования отпечатка на оценку величины фотомеханического эффекта

© А.Б. Герасимов, Г.Д. Чирадзе, Н.Г. Кутивадзе, А.П. Бибилашвили, З.Г. Бохочадзе

Тбилисский государственный университет,
380028 Тбилиси, Грузия

(Поступила в Редакцию 17 июля 1997 г.
В окончательной редакции 26 сентября 1997 г.)

Исследованы анизотропия, спектральная временная зависимость релаксации размеров отпечатков микротвердости в Si. Показано, что временная и спектральная зависимости коррелируют с концентрацией возбужденных носителей в той области (дефектная и упругодеформированная), в которой они возбуждаются, а анизотропия определяется различным видом деформации химических связей при разном положении индентора.

При измерении микротвердости (МТ) методом вдавливания в процессе внедрения индентора в исследуемый материал область, прилегающая непосредственно к отпечатку, деформируется пластически, а часть прилегающей бездефектной области находится в упругодеформированном состоянии [1,2]. При снятии нагрузки такая деформация частично релаксирует, но для кристаллов с ковалентной связью, имеющих высокие значения твердости, значительную хрупкость и низкую пластичность [3], этой релаксацией в обычных условиях пренебрегают. Однако, как оказалось, для корректного определения значения световой МТ, т.е. величины фотомеханического эффекта (ФМЭ) [4], ее учет становится необходимым [5].

На примере монокристаллического Si установлено, что, если нагрузка снимается с освещенной поверхности, след отпечатка (длина диагонали) получается меньшего размера (следовательно, величина ФМЭ имеет заниженное значение), чем в том случае, когда вначале выключается свет и через определенный промежуток времени снимается нагрузка. При равных условиях эксперимента эта разница больше при малых нагрузках и больших освещенностях [5].

В данной работе приводятся результаты исследований временной и спектральной зависимости, а также анизотропии¹ релаксации размеров отпечатков МТ.

Эксперименты проводились на грани (100) бездислокационного монокристаллического Si *n*-типа проводимости с удельным сопротивлением $200 \Omega \cdot \text{cm}$. Перед измерением МТ образцы подвергались механической и химической обработкам, а затем отжигались в вакууме с последующим медленным охлаждением. Измерения МТ проводились на установке "Durimet" по методу вдавливания с использованием стандартной четырехгранной пирамиды Кнупа. Нагрузка на индентор выбиралась равной 25 г. Использовалось освещение двух разных спектральных составов: с энергиями квантов, большей ($h\nu > \Delta E_g$) (режим 1) и меньшей ($h\nu < \Delta E_g$) (режим 2) ширины запрещенной зоны Si. Интенсивности излучений подби-

рались таким образом, что в обоих режимах величины ФМЭ с учетом упругого восстановления отпечатков совпадали.

Эксперименты показали, что в режиме 1 независимо от местоположения индентора на исследуемой грани значение световой МТ экспоненциально зависит от времени, в течение которого после прекращения освещения образец находится под нагрузкой (см. рисунок, а). Как показали контрольные измерения, увеличение времени выдержки исследуемого кристалла под нагрузкой в темноте до времен, используемых в экспериментах с освещением, не влияет на размеры отпечатка. Кроме того, оказалось, что в режиме 1 релаксация размеров отпечатков носит анизотропный характер (см. таблицу). Величина релаксации для направления (100) больше, чем для направления (110). Следует отметить, что независимо от местоположения индентора на исследуемой грани в режиме 1 величина релаксации всегда больше, чем в режиме 2 (см. таблицу). Возможно, из-за малости эффекта в режиме 2 (хотя релаксация размеров отпечатков наблюдается) обнаружить временную зависимость и анизотропию не удается.

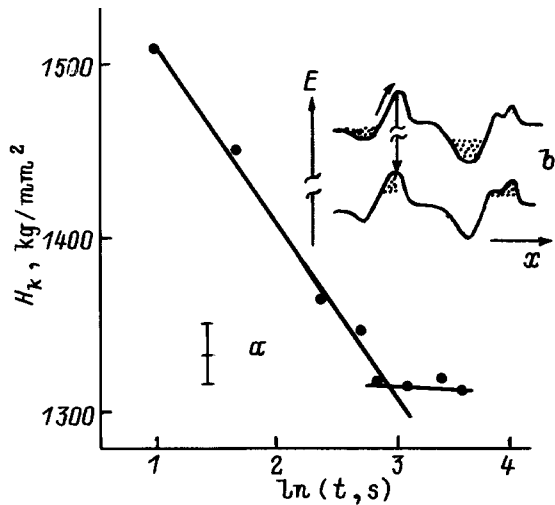
Объяснение приведенных результатов возможно на основе соображений, высказанных в работах [5,7,8]. Согласно им, за размягчение кристаллов с ковалентными химическими связями ответственны неравновесные носители тока, возбужденные из валентной зоны, так называемые антисвязывающие квазичастицы: свободный

Анизотропия релаксации размеров отпечатков

Спектральный состав излучения	$\Delta(H_d - H_l)/H_d, \%$	
	$\parallel \langle 100 \rangle$	$\parallel \langle 110 \rangle$
$h\nu > \Delta E_g$ (режим 1)	11	9
$h\nu < \Delta E_g$ (режим 2)	6	6

¹ Анизотропия МТ — это изменение МТ (обычно измеряемой с помощью удлиненного индентора Кнупа) в зависимости от ориентации индентора на грани монокристалла [6].

П р и м е ч а н и е. Величина релаксации выражена как разность между величинами ФМЭ — $\Delta[(H_d - H_l)/H_d]$ (в %), H_d и H_l — значения МТ соответственно в темноте и в процессе освещения.



а) Уменьшение значений световой МТ во времени, в течение которого после прекращения освещения образец находится под нагрузкой (в данном случае большая диагональ пирамиды Кнупа совпала с направлением $\langle 100 \rangle$). б) Рекомбинационные переходы в приповерхностной области кристалла между искривленными зонами. E — энергия, x — координата вдоль поверхности.

электрон в зоне проводимости и дырка в валентной зоне. В [5] показана корреляция между величинами ФТЭ и соответствующими концентрациями антисвязывающих квазичастиц. Уменьшение релаксации отпечатка со временем, прошедшим после выключения света (см. рисунок, а), т.е. релаксация размягчения поверхностного слоя, происходит из-за наличия в этом слое остаточных концентраций антисвязывающих квазичастиц в энергетических минимумах, т.е. для электронов и дырок неоднократно искривленных энергетических зон (см. рисунок, б). Такое неоднородное искривление в приповерхностной области происходит из-за наличия в этой области разного рода неоднородностей [9]. После прекращения освещения в однородных областях кристалла происходит быстрая рекомбинация носителей, а электроны и дырки, попавшие в соответствующие минимумы, разделенные пространственно, могут рекомбинировать активационным путем после преодоления соответствующего барьера (см. рисунок, б). Именно поэтому после прекращения освещения приповерхностный слой сохраняет размягчение в течение некоторого времени [5]. Этим же объясняется тот факт, что с повышением нагрузки величина эффекта релаксации уменьшается и становится неизмеримой, т.е. на глубине вдавливания индентора в кристалл, до которой распространяется неоднородное искривление зон приповерхностной области.

Величина релаксации в режиме 1 всегда больше, чем в режиме 2, из-за того, что в режиме 1 свет поглощается преимущественно в бездефектной области отпечатка, поэтому упругая деформация в освещенном кристалле распространяется на значительно большем расстоянии от индентора, чем в темноте, а в режиме 2 размягче-

ние светом наступает только для дефектной области, в которой доля упругой деформации мала. Следовательно, при снятии нагрузки упругое восстановление отпечатка в режиме 1 будет происходить более эффективно, чем в режиме 2.

В процессе образования отпечатка под воздействием индентора в ковалентном кристалле происходят сжатие, растяжение и поворот химических связей. Этим объясняется анизотропный характер релаксации размеров отпечатков. В том положении индентора на данной грани, когда значение МТ максимальное, доминирующим является процесс сжатия, а когда значение МТ минимальное, доминируют растяжение и поворот химических связей [10]. В процессе снятия нагрузки с освещенной поверхности кристалла (в режиме 1), когда происходит релаксация упругих напряжений, усилие со стороны упругодеформированной области (в которой химические связи находятся преимущественно в сжатом состоянии) на дефектную область, естественно, будет больше, чем в том случае, когда химические связи ослаблены деформациями растяжения и поворота.

Список литературы

- [1] Ю.С. Боярская, М.И. Вальковская. Микротвердость. Штиинца, Кишинев (1981). С. 67.
- [2] В.П. Алехин, А.П. Терновский. В кн.: Новое в области испытания на микротвердость. Наука, М. (1974). С. 29.
- [3] М.И. Вальковская, Б.М. Пушкаш, Э.Е. Марончук. Пластичность и хрупкость полупроводниковых материалов при испытаниях на микротвердость. Штиинца, Кишинев (1984). С. 100.
- [4] G.K. Kuczynski, R.H. Hochman. Phys. Rev. **108**, 946 (1957).
- [5] А.Б. Герасимов, З.В. Джибути, Г.Д. Чирадзе. Сообщ. АН Грузии **142**, 1, 53 (1991).
- [6] П.Д. Уорен, С.Г. Робертс, П.Б. Хирш. Изв. АН СССР. Сер. физ. **51**, 4, 812 (1987).
- [7] И.Г. Гвердцители, А.Б. Герасимов, З.В. Джибути, М.Г. Пхакадзе. Поверхность, **11**, 132 (1985).
- [8] A.B. Gerasimov. Proc. 4th Int. Conf. Materials Science Forum Vols. N.Y. (1990). V. 65–66. P. 47.
- [9] Вопросы радиационной технологии полупроводников / Под ред. Л.С. Смирнова. Наука, Новосибирск (1980). С. 149.
- [10] A.B. Gerasimov, G.D. Chiradze, N.G. Kutivadze. Bull. Kutaisi University, **2**, 196 (1996).