

# ВЕЛИЧИНА ФОТОМЕХАНИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ПРИ ОСВЕЩЕНИИ ОБРАЗЦА В КОНЦЕ ПРОЦЕССА ИНДЕНТИРОВАНИЯ

*Г.Д. Чирадзе, А.Б. Герасимов\*, Д.Г. Буачидзе\**

*Государственный университет им. Ак. Церетели, Кутаиси, Грузия;*

*\*Грузинский технический университет, Тбилиси, Грузия*

*E-mail: gogichiradze@yahoo.com*

Исследован фотомеханический эффект на (100) поверхности монокристаллического, бездислокационного Si в случаях начала и прекращения воздействия белым светом на разных стадиях процесса микроиндентирования. Показано, что при воздействии освещением в конце процесса индентирования, исходно осуществленного в темноте, величина относительного уменьшения микротвердости в три раза меньше по сравнению со случаем, когда индентирование осуществляется на предварительно освещенной поверхности. На основе данных, полученных в результате исследования временной релаксации размеров отпечатков, показано, что значения световых микротвердостей экспоненциально зависят от времени, в течение которого после прекращения освещения образец находится под нагрузкой. Приведены соответствующие объяснения полученных экспериментальных результатов.

## ВВЕДЕНИЕ

Как известно, полупроводниковые материалы с ковалентными и преимущественно ковалентными химическими связями (используемые в производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем) при комнатной температуре характеризуются высокой хрупкостью и низкой пластичностью. Поэтому для оценки их механических свойств испытание на микротвердость (МТ) является одним из наиболее приемлемых и легко осуществляемых способов [1]. Кроме этого, исходя из физической природы МТ, хотя она не является физической постоянной для данного материала (так как во многом определяется условиями измерения), при равных условиях эксперимента наблюдаемая разница в значениях МТ определяется разностью сил межатомного взаимодействия в исследуемых материалах [2, 3]. Изменение сил межатомного взаимодействия в материалах может быть достигнуто различными воздействиями, в том числе и освещением [4, 5]. Изменение МТ материалов в процессе освещения называется фотомеханическим эффектом (ФМЭ) [6]. Несмотря на то, что существование этого эффекта установлено для широкого класса веществ, дальнейшее его исследование и установление физических закономерностей ФМЭ в полупроводниках являются актуальными не только с научной, но и прикладной точек зрения, поскольку будут способствовать эффективному управлению различными технологическими процессами, стимулированными освещением.

Целью настоящей работы является исследование влияния освещения поверхности Si на разных стадиях процесса индентирования на фотомеханический эффект и последующий сравнительный анализ данных.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились на бездислокационных, монокристаллических образцах Si, n-типа проводимости, с удельным сопротивлением  $\rho = 200 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , легированных Sb с концентрацией  $N_d =$

$= 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Образцы вырезались по поверхностным плоскостям (100), разориентирование не превышало  $0,3^\circ$ .

Измерение МТ осуществлялось на установке DURIMET фирмы "Leitz" по методу вдавливания с помощью стандартной четырехгранной пирамиды Кнупа. Нагрузка на индентор выбиралась равной 25 г, так как при такой нагрузке глубина вдавливания индентором не превышает толщину поверхностного слоя, определяемого обратной величиной коэффициента поглощения света материалом.

Перед измерением поверхности образцов подвергались химико-механической обработке. Толщина естественной окисной пленки SiO<sub>2</sub> на исследуемой поверхности Si, определяемая эллипсометрическим микроскопом, была равна 30 Å. Контрольными экспериментами показано, что слой SiO<sub>2</sub> до 60 Å не влияет на форму кривой зависимости МТ от нагрузки.

В качестве источника света использовались лампы накаливания с вольфрамовой нитью типа K21-150. Лампы располагались равномерно на расстоянии 8 см от исследуемого образца. Угол между нормалью к поверхности образца и направлением светового потока составлял  $60^\circ$ . Для предотвращения термических воздействий система ламп, фильтров и исследуемый кристалл охлаждались потоком воздуха. Измерение температуры освещенной поверхности исследуемого образца и проведенные контрольные эксперименты в темноте при температуре, которая достигалась в процессе освещения, показали, что этот дополнительный малый нагрев не влияет на МТ и тем самым доказывает нетепловую природу наблюдаемого ФМЭ.

Величина ФМЭ оценивалась величиной  $\Delta H/H_0$  ( $\Delta H = H_0 - H_{св}$ , где  $H_0$  и  $H_{св}$  – значения МТ соответственно в темноте и в процессе освещения).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных экспериментов было обнаружено, что значения световых МТ (и соответственно величина ФМЭ –  $\Delta N/N_0$ ) зависят от того, в какой момент индентирования осуществляется начало светового воздействия. Для сравнения результатов измерение МТ проводилось в следующих трех режимах. Вначале определялось значение МТ неосвещенной поверхности (режим 1, темновая МТ). Затем определяли световые МТ в двух разных последовательностях освещения:

- индентирование предварительно освещенной поверхности, а после окончания формирования отпечатка прекращение освещения и по истечении определенного времени – удаление нагрузки (режим 2).

- индентирование неосвещенной поверхности, а после формирования отпечатка – освещение поверхности образца, затем прекращение освещения и по истечении определенного времени – удаление нагрузки (режим 3).

Необходимость истечения определенного времени с момента прекращения освещения до удаления индентора, как показано в работах [7, 8], вызвана тем, что после формирования отпечатков на предварительно освещенной поверхности, если индентор удаляется с освещенной поверхности, отпечатки из-за их релаксации (заплывания размягченной массы) получают сравнительно меньших размеров. В результате значения световых МТ завышены по сравнению с тем случаем, когда сначала прекращается освещение, а после определенного времени удаляются нагрузки.

Значения ФМЭ, соответствующие вышеописанным режимам, приведены в таблице.

Режимы формирования отпечатков, соответствующие световым МТ	$\Delta N/N_0, \%$
Режим 1	0
Режим 2	45
Режим 3	15

Эксперименты показали, что освещение поверхности исследуемого образца в конце индентирования также влияет на величину МТ, т. е. наблюдается ФМЭ. Оказалось, что значения световых МТ вначале экспоненциально уменьшаются со временем, в течение которого после прекращения освещения образец находится под нагрузкой (рис. 1, наклонный участок), а затем перестают изменяться (горизонтальный участок). Как показали контрольные эксперименты, увеличение времени выдержки исследуемого кристалла под нагрузкой в темноте до времени, используемого в экспериментах с освещением, не влияет на конечные величины МТ.

Согласно [4, 5, 7, 8, 10] за размягчение кристаллов с ковалентными и преимущественно ковалентными химическими связями в процессе освещения ответственны неравновесные носители тока, возбужденные из валентной зоны, так называемые антисвязывающие квазичастицы: свободный электрон в зоне проводимости и дырка

(разорванная связь) в валентной зоне, которые ослабляют химические связи между атомами.

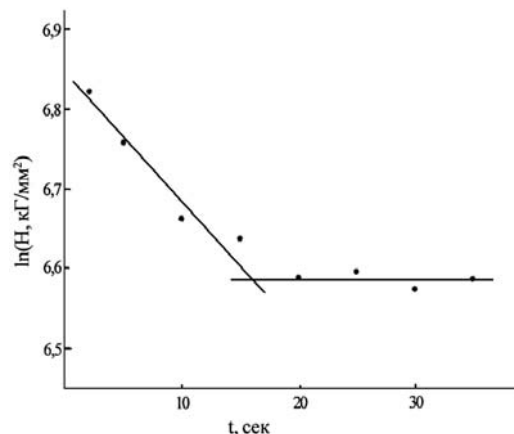


Рис. 1. Зависимость логарифма величин световых МТ от времени, в течение которого образец находится под нагрузкой после прекращения освещения

В приповерхностной области из-за наличия разного рода дефектов имеется неоднородное искривление энергетических зон [9], которые создают энергетические минимумы, разделенные пространственно, для электронов и дырок (рис. 2).

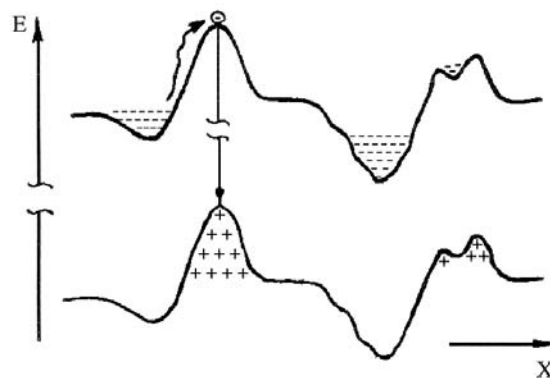


Рис. 2. Рекомбинационные переходы в приповерхностной области полупроводника между искривленными зонами: E – энергия, X – координата вдоль поверхности

После прекращения освещения в однородных областях кристалла происходит быстрая рекомбинация носителей, а в неоднородных областях электроны и дырки, попавшие в соответствующие минимумы, которые разделены пространственно, могут рекомбинировать только активационным путем (см. рис. 2). Именно этим и обусловлено сохранение размягчения приповерхностного слоя при прекращении освещения в течение некоторого времени (остаточный ФМЭ [10]). Приведенные рассуждения подтверждаются уменьшением времени существования остаточного ФМЭ с ростом температуры образца, поскольку при этом увеличивается скорость активационной рекомбинации [10]. При данной температуре с ростом времени, прошедшего с момента прекращения освещения в энергетических минимумах, уменьшается количество

антисвязывающих носителей и соответственно размягчение приповерхностного слоя, что приводит к уменьшению релаксации отпечатка и его увеличению, т. е. уменьшению величины МТ (см. рис. 1, наклонный участок). Горизонтальный участок (см. рис. 1) соответствует состоянию приповерхностной области, когда активационная рекомбинация закончена, и остаточное размягчение сведено до неизмеримого.

В режиме 2 при внедрении индентора часть действующего белого света с энергией квантов, большей ширины запрещенной зоны Si ( $h\nu > \Delta E_g$ , где  $h\nu$  – энергия квантов света, а  $\Delta E_g$  – значение ширины запрещенной зоны), поглощается преимущественно в бездефектной области около отпечатка. Поэтому упругая деформация в освещенном кристалле меньше, чем в темноте, т.е. она меньше препятствует внедрению индентора. Кванты света с энергией  $h\nu < \Delta E_g$  поглощаются в дефектной области отпечатка, в которой доля упругой деформации пренебрежимо мала. Это поглощение обусловлено хвостами плотности состояний в запрещенной зоне полупроводника, образованных в результате разупорядочения кристаллической структуры [11]. Следовательно, в режиме 2 образование дефектной области (т. е. массоперенос материала под давлением индентора) происходит легче по сравнению с темнотой.

Сравнительно низкое значение величины ФМЭ в режиме 3 по сравнению с режимом 2 объясняется следующими двумя факторами.

1. При формировании отпечатка в темноте (режим 1) дефектная область, прилегающая к отпечатку, больше чем, в режиме 2, а бездефектная область (вокруг дефектной области отпечатка) находится в упругонапряженном состоянии и упругими силами деформации препятствует дальнейшему массопереносу материала [8].

2. Освещение уже сформированной дефектной области, находящейся под нагрузкой (режим 3), способствует увеличению подвижности атомов и уменьшению сопротивления материала передвижению индентора, тем самым, увеличивая размеры отпечатков. Однако в этом случае созданная освещением концентрация фотовозбужденных антисвязывающих квазичастиц в дефектной области отпечатка, которая исходно образована в темноте, значительно меньше из-за небольшого времени жизни носителей в этой области.

В режиме 2 образование дефектной структуры (разрушение исходной кристаллической структуры) происходит на освещенной поверхности, и время жизни возбужденных светом антисвязывающих квазичастиц постепенно падает с введением дефектов. Соответственно в этом случае концентрация фотовозбужденных антисвязывающих квазичастиц и влияние на перемещение атомов

(массоперенос) меньше, поэтому и отпечатки получаются меньших размеров. Этим и объясняется наблюдаемая в эксперименте разница.

## ВЫВОДЫ

Уменьшение величины ФМЭ при освещении поверхности образца в конце индентирования по сравнению с индентированием освещенной поверхности связано со снижением концентрации фотовозбужденных антисвязывающих квазичастиц в результате большей скорости рекомбинации в исходно дефектной области, образуемой вокруг отпечатка.

## ЛИТЕРАТУРА

1. М.И. Вальковская, Б.М. Пушкаш, Э.Е. Марончук. *Пластичность и хрупкость полупроводниковых материалов при испытаниях на микротвердость*. Кишинев: Штинца, 1984, 104 с.
2. М.М. Хрущев. Физическая природа микротвердости // *Методы испытания на микротвердость*. М.: «Наука», 1965, с. 7-16.
3. В.М. Глазов, В.Н. Вигдорович. *Микротвердость металлов и полупроводников*. М.: «Металлургия», 1969, 248 с.
4. A.B. Gerasimov. Electron-hole mechanism of migration of defect and interaction // *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference, Materials Science Forum, USA, New-York*. 1990, v. 65-66, p. 47-49.
5. D.G. Buachidze, G.D. Chiradze, A.B. Gerasimov. Physical Nature of Acceleration of Mass Transfer in the Solid State under concentrated Load // *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Ceramic Congress & 4<sup>th</sup> Forum on New Materials, CIMTEC-2006, Italy, Sicily*. 2006, p. 133-134.
6. G.G. Kuczynski, R.F. Hochman. Light-induced plasticity in semiconductors // *Phys. Rev.* 1957, v. 108, p. 946-948.
7. А.Б. Герасимов, Г.Д. Чирадзе, З.В. Джибути. Влияние концентрации антисвязывающих электронов и дырок на поверхностную твердость // *Сообщение АН Грузии*. 1987, т. 141, № 1, с. 53-55.
8. А.Б. Герасимов, Г.Д. Чирадзе, Н.Г. Кутивадзе. Влияние режима формирования отпечатка на оценку величины фотомеханического эффекта // *ФТТ*. 1998, т. 40, №3, с. 503-504.
9. Вопросы радиационной технологии полупроводников / Ред. Л.С. Смирнова. Новосибирск: «Наука», 1980, 191 с.
10. А.Б. Герасимов, Г.Д. Чирадзе, Н.Г. Кутивадзе. К механизму остаточного фотомеханического эффекта // *ФТТ*. 2000, т. 42, в. 4, с. 683-685.
11. Н. Мотт, Э. Девис. *Электронные процессы в некристаллических веществах*. М.: «Мир», 1982, т. 1, с. 132.

Статья поступила в редакцию 13.05.2011 г.

## **ВЕЛИЧИНА ФОТОМЕХАНІЧНОГО ЕФЕКТУ ПРИ ОСВІТЛЕННІ ЗРАЗКА В КІНЦІ ПРОЦЕСУ ІНДЕНТУВАННЯ**

*Г.Д. Чирадзе, А.Б. Герасимов, Д.Г. Буачидзе*

Досліджено фотомеханічний ефект на (100) поверхні монокристалічного, бездислокаційного Si у випадках початку і припинення впливу білим світлом на різних стадіях процесу мікроіндентування. Показано, що при впливі освітленням в кінці процесу індентування, який було здійснено в темноті, величина відносного зменшення мікротвердості в три рази менша в порівнянні з випадком, коли індентування здійснюється на попередньо освітленій поверхні. На основі даних, одержаних у результаті дослідження часової релаксації розмірів відбитків, показано, що значення світлових мікротвердостей експоненціально залежить від часу, протягом якого після пониження освітлення зразок знаходиться під навантаженням. Приведено відповідні пояснення одержаних експериментальних результатів.

## **EFFECT OF ILLUMINATION ON THE Si SAMPLES BEING UNDER THE LOAD AT THE END OF THE MICRO-INDENTATION PROCESS**

*G.D. Chiradze, A.B. Gerasimov, D.G. Buachidze*

There is considered in a given work the photomechanical effect on (100) the surface of single-crystal dislocation-free Si in cases of the beginning and stopping the action by white light at the different stages of micro-indentation process. There is shown that in case, when action by illumination is carried out at the end of the indentation process, initially current in the darkness conditions, the value of the relative decrease of micro hardness is in three times less in comparison with the case, when indentation is carried out at the preliminary illuminated surface. Also, on the basis of data obtained in the issue of study of the temporal relaxation imprints' dimensions, there is shown that values of the light micro hardness exponentially depend on the period of time, when the model is under the load after illumination ceases. There are given appropriate interpretations of the obtained experimental results.