

УДК 621.362

## ВЛИЯНИЕ НАГРУЗКИ НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ ФОТОМЕХАНИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Чирадзе Г.Д., Герасимов А.Б.

*Государственный университет Акакия Церетели, Кутаиси, e-mail: gogichiradze@yahoo.com*

В работе приведены результаты исследований температурной зависимости фотомеханического эффекта на примере монокристаллического кремния в случаях разных нагрузок на индентор. Показано что температура при которой происходит слияние темновых и световых кривых температурной зависимости фотомеханического эффекта, при неизменной интенсивности освещения зависит от нагрузки на индентор, причем, при малой нагрузке слияние кривых происходит при более высокой температуре, чем при большой нагрузке. Объяснение полученных экспериментальных данных основано на том, что уменьшение микротвердости материала происходит из-за расслабления сил межатомных химических связей под влиянием антисвязывающих квазичастиц, генерируемых при соответствующих воздействиях (температура, освещение), и из-за уменьшения концентрации фотовозбужденных антисвязывающих квазичастиц от поверхности в глубь объема, соотношение этих концентраций меняется с ростом глубины внедрения индентора.

**Ключевые слова:** микротвердость, фотомеханический эффект, антисвязывающие квазичастицы

## INFLUENCE OF LOADING ON THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF PHOTOMECHANICAL EFFECT

Chiradze G.D., Gerasimov A.B.

*Akaki Tsereteli State University, Kutaisi, e-mail: gogichiradze@yahoo.com*

The paper dwells on research results of temperature dependence of photomechanical effect (PME) by the example of single-crystal silicon in the case of different loadings on the indenter. There is shown that the temperature at which there is occurred merging of dark and light curves of temperature dependence of PME, at constant illumination intensity, depends on loading on the indenter, and at light load the curve merging is occurred at higher temperature than under heavy load. Explanation of findings is based on the fact that decrease of microhardness of the material occurs due to weakening the interatomic chemical bonds under the influence of antibonding quasi-particles, which are generated under required actions (temperature, illumination), as well as due to concentration reduction of photoexcited antibonding quasi-particles from the surface to the depth of the volume, and the ratio of these concentrations varies with the growing depth of penetration of the indenter.

**Keywords:** microhardness, photomechanical effect, antibonding quasi-particles

Существование температурной области фотомеханического эффекта (ФМЭ) (изменение микротвердости (МТ) материалов в процессе освещения [1]) в полупроводниках и в некоторых соединениях было показано в работах [2-4]. Было установлено, что при достижении определенной температуры образца происходит слияние температурной-темновой (темновой) и температурной-световой (световой) кривых, и при дальнейшем росте температуры, освещение не вносит вклада в уменьшение микротвердости, (т.е. существует определенная температурная область для существования ФМЭ), за которой освещение не вносит вклада в уменьшении МТ, и МТ меняется только температурой). Было высказано предположение о том, что температура слияния темновых и световых кривых может быть характерной физической постоянной для данного материала, правда сами авторы это заключение считали одним из возможных причин этого явления [5]. Однако, что касается физической природы данного явления, она не была расшифрована. Позже было установлено, что величина температурного диапазона существования ФМЭ

и тем самым местоположение точки слияния температурных и световых кривых, зависит от интенсивности освещения [6]. Кроме этого, как известно, значения световых микротвердостей и соответственно величина ФМЭ, зависит от глубины внедрения индентора в исследуемый материал – что определяется нагрузкой приложенной на индентор [7]. Исходя из этого, разная нагрузка должна по-разному отразиться на температурную зависимость ФМЭ, однако результаты таких исследований в литературе отсутствуют.

Приведенная выше неясность в решении данного вопроса, по нашему мнению обусловлено отсутствием экспериментальных данных температурной зависимости ФМЭ при разных нагрузках на индентор и не существование, к тому времени, механизма ФМЭ, предложенных в работах [6, 8, 9].

**Цель исследования.** Целью настоящей работы являлось исследование температурной зависимости ФМЭ на примере Si, в случае приложения на индентор нагрузок разных величин, и объяснение полученных данных новым механизмом ФМЭ.

**Материалы и методы исследования**

Объектом исследований был выбран монокристаллический, бездислокационный Si, n-типа проводимости, с удельным сопротивлением  $r = 200$  ом.см., которые были легированы Sb концентрацией  $N_d = 2,3 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>. Образцы вырезались по поверхностным плоскостям (100), разориентировка не превышала  $0,3^\circ$ . Измерение микротвердости осуществлялось на установке «Dugimet» по методу вдавливания с помощью стандартной четырехгранной пирамиды Кнупа. Перед измерением поверхности образцов подвергались химико-механической обработке с последующим отжигом в вакууме. В экспериментах большая диагональ пирамиды Кнупа всегда совпадала с направлением  $\langle 100 \rangle$  исследуемой (100) плоскости. Нагрузка на индентор составляла 25 и 50 г. Освещение осуществлялось источниками белого света (были использованы лампы накаливания с вольфрамовой

нитью типа K21-150). Для достижения необходимых температур образцов был сконструирован специальный нагреватель позволяющий стабилизировать температуру в процессе измерения. Толщина пленки SiO<sub>2</sub> на исследуемой поверхности Si измеряемая эллипсометрическим микроскопом была порядка 30Å. Контрольными экспериментами было показано, что при достижении максимальной температуры образца слой SiO<sub>2</sub> не превышал 50Å, который не влиял на форму кривой зависимости МТ от нагрузки.

**Результаты исследования и их обсуждение**

Как видно из рис. 1, с ростом температуры образца слияние темновых и световых кривых при нагрузке на индентор 25 г, происходит сравнительно при большей температуре, чем при нагрузке, равной 50 г.

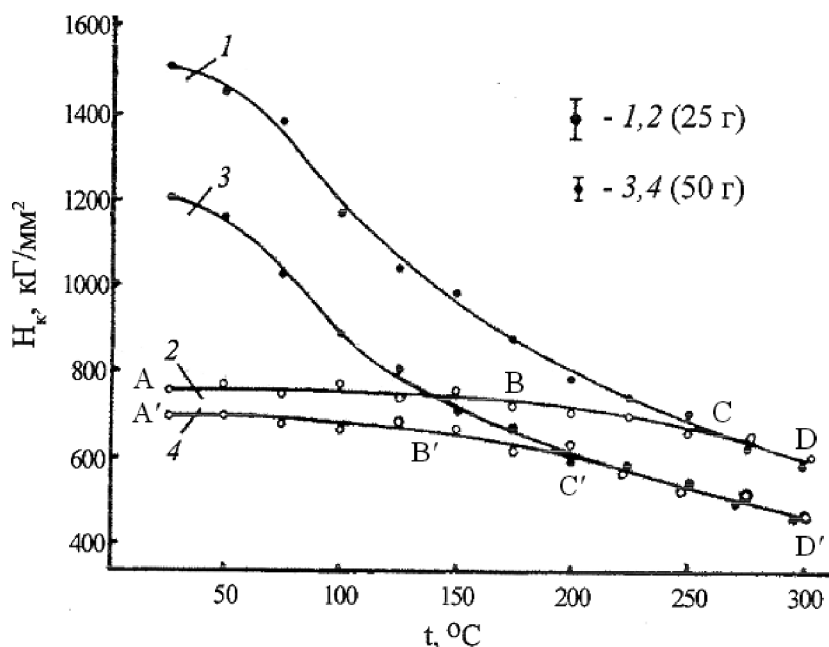


Рис. 1. Температурная зависимость темновых (1,3) и световых (2,4) микротвердостей в Si в случае двух разных нагрузок на индентор

Из рис. 1 также видно, что в случае освещения, различие в значениях световых МТ, обусловленное разными нагрузками на индентор, существенно меньше чем аналогичная различие исходно существующая в темноте (левые крайние точки на рис. 1, соответственно кривые 2,4 и 1,3). Кроме этого разность в значениях темновых МТ (рис. 1, кривые 1 и 3), вызванная разными нагрузками на индентор, с ростом температуры образца постепенно уменьшается.

Полученные экспериментальные данные могут быть объяснены на основе меха-

низма ФМЭ, упомянутого во введении настоящей работы, который основан на новых представлениях о передвижении атомов в кристаллических твердых телах [10-12], и с учетом того, что на поверхности монокристаллического Si существует тонкий поверхностный слой высокой твердости (рис. 2), который по-разному влияет на значение МТ в зависимости от глубины внедрения индентора в материал [7]. Для Si, используемого в настоящей работе, толщина этого слоя составляет  $\sim 0,1$  мкм.

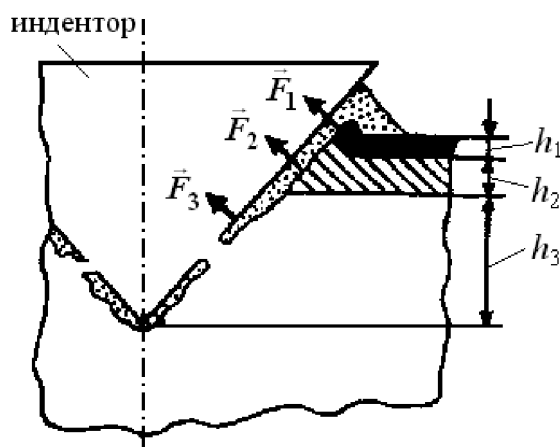


Рис. 2. Схематическое изображение внедрения индентора в материал:  $h_1$  и  $h_2$  соответственно толщины поверхностного и приповерхностного слоев,  $h_3$  – толщина слоя со стационарным значением твердости.  $F_i$  – сила, действующая на индентор с соответствующего слоя

В случае нагрузки на индентор 25 г глубина внедрения индентора гораздо меньше, чем в случае нагрузки 50 г. Исходя из этого, естественно, что доля высокотвердого поверхностного слоя в противодействии индентору с нагрузкой 25 г, будет гораздо больше, чем в случае нагрузки 50 г. Значение твердости этого поверхностного слоя можно менять путем воздействия светом [7].

Согласно представлений развитых в работах [10-12], за уменьшение МТ кристаллических твердых тел в процессе внешних воздействий (свет, температура, электрическое и магнитное поле), ответственными являются носители тока образованные в результате этих воздействий, которые вызывают облегчение изменение местоположения атомов в твердом теле, приводящее к его размягчению и соответственно к уменьшению МТ. При этом напомним, что образованные этими воздействиями носители тока являются антисвязывающими квазичастицами (АКЧ), ослабляющими химические связи между атомами, около которых они появляются при своем хаотическом движении [10-12]. В соответствии с теорией молекулярных орбиталей химической связи, распространенной на твердые тела и жидкости [13], в приближении сильной связи и применением метода линейной комбинации атомных орбиталей

(ЛКАО) энергетический спектр электронов связи состоит из связывающих и антисвязывающих зон (рис. 3).

В полупроводниках эти зоны разделены запрещенной зоной, в металлах они могут быть перекрыты. Нахождение электрона в связывающей зоне увеличивает, а его отсутствие (дырка) уменьшает силу химической связи. Сила химической связи данного атома (молекулы) с соседними определяется разностью количества связывающих и антисвязывающих электронов находящихся около него. Чем меньше эта разность тем слабее химическая связь, а при равенстве разности нулю химическая связь исчезает (сублимация, испарение, кипение). Таким образом, в твердых телах электроны, участвующие в создании химической связи, могут находиться в двух квантовых состояниях: находясь в одном они увеличивают энергию химической связи (связывающие состояния), в другом – уменьшают (антисвязывающие состояния). В металлах переходы электронов из связывающей зоны в антисвязывающую зону осуществляются между уровнями находящихся ниже уровня Ферми и дном антисвязывающей зоны. Это энергетическое расстояние называется псевдо запрещенной зоной (рис. 3).

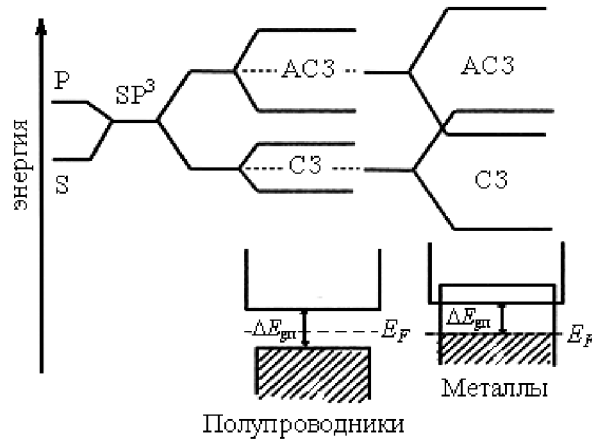


Рис. 3. Возникновение гибридных  $sp^3$  орбиталей, их расщепление на связывающие и антисвязывающие орбитали и при сближении атомов, возникновение из них соответственно связывающих (СЗ) и антисвязывающих (АСЗ) зон:  
 $DE_g$  – ширина запрещенной зоны в полупроводниках,  $DE_{gn}$  – псевдозапрещенная зона в металлах,  
 $E_F$  – уровень Ферми

Перевод электронов можно осуществить разным способом (свет, температура, электрическое и магнитное поле, инжекция), и в любом случае передвижение атома будет облегчено. Поэтому при одинаковой нагрузке на индентор, но разных интенсивностях освещения, зависимость местоположения точки слияния темновых и световых кривых (температурной зависимости ФМЭ), от интенсивности освещения наблюдаемая в работе [6], определяется соотношением концентрации АКЧ созданных соответственно температурой и освещением. В частности в той области где концентрация АКЧ генерируемых светом  $n_{cb} > n_t$  температурная зависимость ФМЭ (влияние температуры на световую МТ) отсутствует (рис. 1, обл. АВ и А<sup>1</sup>В<sup>1</sup>). В той же области где  $n_t > n_{cb}$  отсутствует влияние света на МТ, т.е. остается только влияние температуры (рис. 1, обл. CD и C<sup>1</sup>D<sup>1</sup>), а в области где  $n_t \approx n_{cb}$  МТ меняется под влиянием обеих воздействий (рис. 1, обл. BC и B<sup>1</sup>C<sup>1</sup>), а местоположение точки слияния температурных и световых кривых определяется равенством  $n_t = n_{cb}$ . (рис. 1, точки С и С<sup>1</sup>). Это подтверждается тем, что при одинаковой нагрузке на индентор, с ростом интенсивности освещения точка слияния темновых и световых кривых сдвигается к высоким температурам [6]. В случае нагрузки 25 г глубина внедрения индентора меньше, чем при нагрузке 50 г, и поскольку концентрация генерируемых светом АКЧ с глубиной экспоненциально падает, то это концентрация при глубине внедрения индентора в случае 25 г, больше чем в случае 50 г и для выполнения равенства  $n_t = n_{cb}$  не-

обходима большая концентрация  $n_t$ , т.е. более высокая температура.

То, что различие в величинах световых МТ при разных нагрузках, значительно меньше, чем аналогичное различие исходно существующая в темноте (рис.1, левые крайние точки кривых 2,4 и 1,3), это обусловлено тем, что в темноте доля высокотвердого поверхностного слоя в общем значении МТ значительно больше, чем при освещении, когда его твердость падает под влиянием света.

Уменьшение с ростом температуры разности в значениях темновых МТ, для разных нагрузок на индентор (рис.1, кривые 1 и 3), связано стем, что поверхностный слой испытывает большее расслабляющее действие АКЧ, из-за их отражения от поверхности, при их хаотическом движении. Следовательно эффективная концентрация АКЧ, в поверхностном слое больше чем реальная концентрация в объеме, генерированная температурой [14]. С ростом температуры этот эффект увеличивается и роль высокотвердого поверхностного слоя в величине МТ уменьшается, поэтому МТ при нагрузке 25 г с ростом температуры уменьшается быстрее, чем при нагрузке 50 г.

### Заключение

Температура при которой происходит слияние темновых и световых кривых температурной зависимости ФМЭ не является характерной физической постоянной для данного материала, и при одинаковой интенсивности освещения зависит от нагрузки на индентор, при этом в случае малой нагрузки слияние кривых происходит при

более высокой температуре, чем при большой нагрузке.

При совместном воздействии на образец температуры и белого света уменьшение МТ происходит из-за уменьшения силы химической связи под влиянием АКЧ, генерируемых температурой и светом. Величина эффекта влияния каждого из этих воздействий зависит от концентрации АКЧ образованных соответственно каждым из них, что определяет какая из этих воздействий будет преобладать. В случае освещения, из-за уменьшения концентрация фотозвужденных АКЧ от поверхности в глубь объема, соотношение этих концентрации меняется с ростом глубины внедрения индентора. При этом необходимо учитывать, что высокотвердый поверхностный слой размягчается больше, чем следующие за ним области объёма, не только под влиянием света, но и температуры.

#### Список литературы

1. Kuczynski G.G., Hochman R.F. Light-induced plasticity in semiconductors // *Phys. Rev.* – 1957. – V.108. – P.946-948.
2. Кузьменко П.П., Новиков Н.Н., Горидько Н.Я. Температурная область фотомеханического эффекта в Ge // *ФТТ.* – 1964. – Т.6. – В.9. – С. 2560-2563.
3. Кузьменко П.П., Новиков Н.Н., Горидько Н.Я., Федоренко Л.И. Фотомеханический эффект в полупроводниках с примесями слабо растворимых элементов // *ФТТ.* 1966. – Т.8. – В.6. – С. 1732-1735.
4. Курьло И.В. Фотомеханический эффект в кристаллах CdTe, HgTe // *Вестник Львовского политехнического института.* – 1988. – № 226. – С. 128-131.
5. Кузьменко П.П., Горидько Н.Я., Руденко А.Г. Фотомеханический эффект в сульфиде кадмия // *Изв. ВУЗ, сер. Физика.* – 1964. – № 4. – С. 22-27.
6. Герасимов А.Б., Чирадзе Г.Д., Кутивадзе Н.Г. Исследование физической природы фотомеханического эффекта // *ФТП.* – 2001. – Т. 35. – В. 1. – С.70-74.
7. Герасимов А.Б., Чирадзе Г.Д., Кутивадзе Н.Г. О распределении величины микротвердости по глубине образца // *ФТТ.*-1999.-Т.41. – В.7. – С.1225-1227
8. Герасимов А.Б., Чирадзе Г.Д. Влияние концентрации антисвязывающих электронов и дырок на поверхностную твердость // *Сообщения АН Грузии.* – 1991. – Т.141. – № 1.С.53-55.
9. Герасимов А.Б., Чирадзе Г.Д. Влияние рода и концентрации мелких примесей на микротвердость и фотомеханический эффект в полупроводниках // *ФТП.* – 2001. – Т.35.В. – 4, С. 385-386.
10. Герасимов А.Б. Основы низкотемпературной технологии создания полупроводниковых приборов. – Тбилиси: Изд-во ТГУ, 2005. 385 с.
11. Gerasimov A.B. Electron-hole mechanism of migration of defect and interaction // *Mater. Sci. Forum, New-York,* 1990, v. 65-66, p. 47-52.
12. Герасимов А.Б. Основы молекулярно потенциальной теории // *Нанотехнологии. Нано-2012: Содержания. 2-я международная конференция.* Тбилиси, 2012. – С. 160-169.
13. Харрисон У. Электронная структура и свойства твердых тел. – М.: Мир, 1983, 284 с.
14. Gerasimov A.B., Chiradze G.D. Physical Nature of the Thermomechanical Effect // *Proceedings of Tbilisi University, Physics.* – 1999. – V. 34. – P. 79-82.