

¹ студентка 5 курса физико-математического факультета, ДГПУ

² доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой физики, ДГПУ

e-mail: Alena-Demchenko1989@mail.ru

ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ КОВАЛЕНТНЫХ КРИСТАЛЛОВ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В работе кратко рассмотрены основные положения теорий хрупкого разрушения ковалентных полупроводников и в том числе некоторые результаты экспериментов, выполненные на кафедре физики.

Ключевые слова: монокристалл, германий, разрушение, дефекты структуры.

Введение

В настоящее время нет достаточно полной теории хрупкого разрушения полупроводников, отражающей детали микромеханизма разрушений. Еще сравнительно недавно [1] существовало широко распространенное мнение о свойствах германия и кремния, как о чрезвычайно хрупких материалах при температурах 300-400К. Теоретические представления развивались, в основном, для таких твердых тел, как стекла и некоторые металлы. Хрупкое разрушение происходит в том случае, если предел прочности материала оказывается ниже предела упругости. В литературе [2 – 6] известны теории хрупкого разрушения Поляни, Коттрелла, Гриффитса, Стро и Журкова.

Основная часть

Простейший метод оценки теоретической прочности был предложен Поляни. В этом методе предполагается, что для осуществления разрыва кристалла необходимо приложить такое напряжение, которое способно увеличить расстояние между атомными плоскостями на величину порядка параметра решетки a . Полученные значения теоретической прочности для таких материалов, как медь и серебро оказались равными $\sigma_0 \approx 0,6 \cdot 10^{10}$ Па.

Определение σ_0 по теплоте сублимации (испарения) дает также близкие значения для указанных выше материалов.

Некоторые авторы [7] определяли σ_0 из сил межмолекулярного взаимодействия. Для этого привлекалась зависимость потенциальной энергии $U(x)$ и силы взаимодействия $f(x)$ между частицами твердого тела с изменением расстояния между ними. Сравнение теоретической прочности σ_0 , вычисленной тремя разными методами, показывает, что все они приводят примерно к одним и тем же значениям, по порядку величины равным $0,1E$, где E – модуль упругости кристалла. При этом значение σ_0 представляет огромную величину в интервале $10^9 - 10^{10}$ Па.

Реальная, или техническая прочность σ_p кристаллов, которая важна в технике, оказалась на 2 – 3 порядка ниже их теоретической прочности σ_0 . В настоящее время принято считать, что такое различие между σ_p и σ_0 обусловлено наличием в реальных твердых телах всевозможных дефектов, в частности микротрещин, выделений второй фазы, снижающих прочность тел. Впервые такая точка зрения была высказана Гриффитсом [2], которому и принадлежит метод расчета технической прочности кристаллов. В постановке Гриффитса задача сводилась к определению растягивающего напряжения, возникающего в хрупком теле и приводящего к необратимому расширению краев внутренней трещины. Критические оценки этой теории различными экспериментаторами показали её несостоятельность для полупроводниковых кристаллов при сравнении с результатами эксперимента. В большом обзоре О.Джонсон и П.Гиббс [7] констатировали, что на величину σ_p монокристаллического германия (Ge) не влияет: метод выращивания, плотность дислокаций в интервале значений $10^3 - 10^8$ см⁻², испытания в различных кислотах, щелочах, растворителях и освещение внешним источником. Это оказалось необъяснимым, поскольку внешняя среда должна изменять поверхностную энергию γ_p кристалла и значение $\sigma_p = \sqrt{2E\gamma_p/\pi a}$, где a – межатомное расстояние. Можно оправдать независимость σ_p от плотности дислокаций, поскольку они неподвижны в интервале температур 300 - 400К и основным тормозом для их движения являются высокие значения потенциала Пайерлса, свойственные для ковалентных кристаллов. При этом дислокации не способны накапливаться и локально создавать концентрацию напряжений для разрыва межатомных связей.

Выход из такого затруднительного положения, связанного с применением теории Гриффитса, можно найти, используя новые результаты, полученные в работах [8, 9]. Так, в работе [8] было установлено с использованием оптической и электронной микроскопии, рентгеновской топографии, электрических измерений структурно-чувствительных параметров, что приповерхностные слои кристаллов Ge, Si, толщиной до 30 – 50 мкм обладают

аномально пластичными свойствами, и в них проявляется диффузионный массоперенос вещества при пониженных температурах. Внутренняя, более прочная часть кристалла, в которой не проявляется пластичность при низких температурах, оказывается при этом защищенной от воздействия внешних факторов приповерхностным пластичным слоем. Поэтому в целом кристалл может только тогда разрушиться, если влияние внешних факторов, как минимум, распространяется с поверхности до границы раздела с очень прочной объемной частью кристалла. В данном случае имеется в виду воздействие поверхностно-активной среды, освещения, а также зародышевых трещин от контакта с деформирующим устройством. Активными концентраторами напряжений могут быть также выделения второй фазы типа GeO_x , всегда существующие в выращенных монокристаллах германия.

Выводы

Рассмотрены методы оценки теоретической прочности твердых тел, указаны существенно большие её значения (на 1 – 2 порядка величины) по сравнению с технической прочностью и причины такого различия. Предложено возможное объяснение несоответствия σ_p в теории Гриффитса с экспериментальными значениями.

Литература

1. Батавин В.В., Концевой Ю. А., Федорович Ю. В. тур. — М.: Радио и связь, 1985. — 264 с.
2. Концевой Ю.А. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур / Ю.А. Концевой, Ю.М. Литвинов, Э.А. Фаттахов. — М.: Радио и связь, 1982. — 239 с.
3. Stroh A.N. The formation of cracks as a result of plastic flow // Proc. Roy. Soc. — 1954. — Vol. 223, №1154. — P. 404–414.
4. Cottrell A.N. Theory of brittle fracture in steel and similar materials // Trans. Am. Inst. Metall. Petrol. Engrs. — 1958. — V. 212. — P. 192–203.
5. Журков С.Н. Временная зависимость прочности твердых тел / С.Н. Журков, Б.Н. Нарзуллаев // ЖТФ. — 1953. — Т.23, вып.10. — С. 1677–1689.
6. Журков С.Н. Проблема прочности твердых тел // Вестн. АН СССР. — 1954. — Т. 11. — С. 78–82.
7. Джонсон О. Хрупкое разрушение германия / О. Джонсон, П. Гиббс; пер.с англ. З.Г. Фридмана // Разрушение твердых тел. — М. : Металлургия, 1967. — С. 122–145.

8. *Надточий В.А.* Микропластичность алмазоподобных кристаллов (Si, Ge, GaAs, InAs) / Надточий В.А. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07. — Харьков, 2006. — 471 с.
 9. *Корсуков В.Е.* Зарождение разрушения в поверхностных слоях монокристаллов Ge и Si / В.Е. Корсуков, С.А. Князев, А.С. Лукьяненко [и др.] // ФТТ. — 1996. — Т.38, №1. — С. 113–121.
-

Demchenko A.S., Nadtochiy V.A.

Donbas State Teachers' Training University, Slavyans'k, Ukraine.

Physical mechanisms of covalent crystals fracture at low temperatures

The main theses of covalent semiconductor fracture theory and some experiments results which were completed on the physics department are scrutinized in the article.

Keywords: *monocrystal, germanium, fracture, structure defect.*
