

Деформационный механизм возникновения фазового перехода при полировке образцов SmS

© Л.Н. Васильев, В.В. Каминский, Ш. Лани*

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия
* Институт физики САН,
84228 Братислава, Словакия

(Поступила в Редакцию 21 октября 1996 г.)

Исследовано поведение контакта полупроводникового моносulfида самария с железом под действием давления. Показано, что наблюдающийся скачок проводимости контакта соответствует фазовому переходу SmS в металлическое состояние. На основании расчета деформаций, создаваемых сферическим индентором в момент фазового перехода, сделан вывод о причинах возникновения металлической фазы на поверхности образца SmS при его полировке.

Образование тонкой пленки металлической фазы моносulfида самария на поверхности полупроводникового образца при его полировке абразивной пастой было впервые обнаружено Жузе с сотрудниками [1,2]. Несмотря на то что это явление уже нашло практическое применение для регулировки электросопротивления резисторов [3], механизм его не вполне ясен. Поскольку фазовый переход полупроводник–металл в SmS происходит под действием гидростатического сжатия давлениями выше 650 МПа [2], можно было предположить, что области такого сжатия образуются в местах контакта крупинки абразива с поверхностью образца [4]. Распределение деформаций при этом может быть рассчитано по формулам, применяемым для определения деформаций, возникающих в материале под действием давления сферического индентора. Однако анализ результатов расчетов деформаций, возникающих под индентором в различных полупроводниках [5], показывает, что в материале, деформируемом индентором, отсутствуют области гидростатического сжатия. Распределение деформаций имеет достаточно сложный характер, и соотношение компонент тензора деформации вблизи поверхности полупроводника, скорее, соответствует одноосному и одностороннему сжатиям. Для выяснения механизма фазового перехода полупроводник–металл, индуцируемого полировкой образцов SmS, необходимо определить напряженное состояние материала в полупроводниковой фазе в момент фазового перехода, что и было сделано в настоящей работе.

Эксперименты проводились на монокристаллах SmS, выколотых по плоскостям спайности {100}, {010} и {001}. Наибольшую сложность представляет определение момента (критической нагрузки) фазового перехода под индентором. Поскольку нами было обнаружено, что контакт SmS с железом обладает запирающими свойствами (вольт-амперная характеристика такого контакта при $T = 300$ К представлена на рис. 1), в качестве индентора использовалась стальная игла с радиусом закругления $R = 36 \mu\text{m}$.

Эксперимент состоял в измерении тока I , протекающего через контакт SmS–Fe, при постепенном увеличении силы F , приложенной к индентору. Задача сводилась к определению значения F в момент фазового перехода полупроводник–металл в SmS, который должен был проявлять себя резким увеличением I . Сила F была приложена к игле направления, перпендикулярном поверхности образца, на противоположную поверхность которого был нанесен индиевый контакт. Между этим контактом и иглой подавалось напряжение 0.3 В. На рис. 2 показана зависимость I от F при повышении и понижении нагрузки при $T = 300$ К. Скачок I происходил при $F \sim 0.4$ Н и имел обратимый характер с гистерезисом, как и фазовый переход полупроводник–металл в SmS под действием гидростатического сжатия.

Компоненты тензора деформации рассчитывались по формулам, полученным из соотношений [5]

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{1 + \sigma}{2\pi Y} \iint_S \left\{ \frac{x}{r^3} \left[1 - \frac{3(x-x')^2}{r^2} \right]^2 - \frac{1 - 2\sigma}{r(r+z)} \right. \\ &\quad \left. \times \left[1 - \frac{(2r+z)(x-x')^2}{r^2(r+z)} \right]^2 \right\} P(x', y') dx' dy', \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{1 + \sigma}{2\pi Y} \iint_S \left(2\sigma - \frac{3z^2}{r^2} \right) \frac{z}{r^3} P(x', y') dx' dy', \end{aligned}$$

где

$$r = [(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2]^{1/2},$$

$$P(x, y) = 3F[1 - (x^2 + y^2)/2]^{1/2}/2\pi a^2.$$

Интегрирование производится по области соприкосновения индентора с образцом S , являющейся кругом с радиусом $a = (RFD)^{1/3}$, где

$$D = \frac{3}{4} \left(\frac{1 - \sigma^2}{Y} + \frac{1 - \sigma'^2}{Y'} \right)$$

— величина, характеризующая упругие свойства сдавливаемых тел ($Y = 1.2 \cdot 10^5$ МПа и

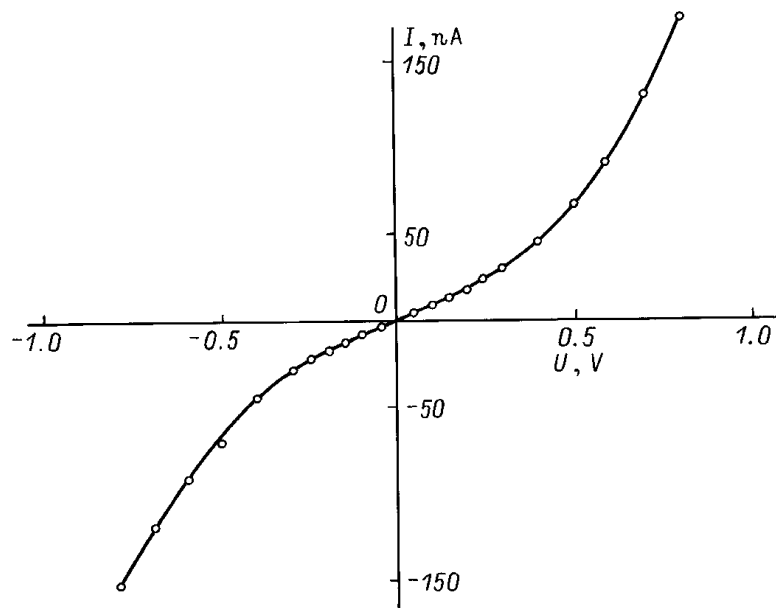


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика контакта стальной иглы с поверхностью монокристалла SmS ($F \approx 0$).

$Y' = 2.1 \cdot 10^5$ МПа — модули Юнга SmS в кристаллографическом направлении [100] и стали, а $\sigma = 0.084$ и $\sigma' = 0.287$ — соответствующие коэффициенты Пуассона).

На рис. 3, а показаны значения компонент тензора деформации для нашего случая, а также для кремния при тех же параметрах механического воздействия. Вблизи поверхности ($z = 0.4a \approx 2 \mu\text{m}$ для SmS) имеем область неоднородного всестороннего сжатия в случае сульфида самария и квазиодноосного сжатия (ε_{xx} и ε_{zz} разных знаков) в случае кремния. Если полагать, что фазовый переход при данном распределении деформаций происходит, как и в случае гидростатического сжатия, при накоплении в зоне проводимости некоторой критической концентрации электронов [6], а также учесть, что изменение концентрации электронов проводимости в SmS зависит лишь от изменения объема образца при его деформировании [7], то следует рассмотреть изменение объема материала в областях под индентором $\Delta = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$ (рис. 3, б). Из результатов [8] следует, что SmS переходит в металлическое состояние при уменьшении объема образца гидростатическим сжатием на 6%. Такие и большие величины Δ имеет место при $z < 0.4a$ вблизи центра площади соприкосновения индентора с образцом ($\rho = (x^2 + y^2)^{1/2} \leq 0.6a$), и, следовательно, приложенная нагрузка достаточна для накопления критической концентрации электронов проводимости и возникновения в этой области фазового перехода полупроводник–металл. Помимо скачка I (рис. 2, б) о наличии фазового перехода при $F > 0.4$ N свидетельствует тот факт, что в отпечатках индентора, оставшихся на образце после эксперимента, в некоторых случаях наблюдались желто-золотистые

пятна металлической фазы SmS. Диаметр отпечатков был $\sim 10 \mu\text{m}$, что соответствует расчетному значению диаметра области соприкосновения индентора с образцом и подтверждает правильность расчетов.

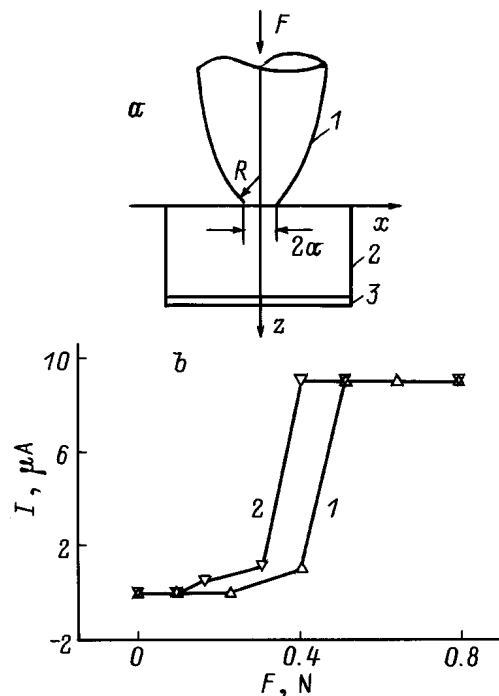


Рис. 2. Определение критической нагрузки, вызывающей фазовый переход. а) Конфигурация эксперимента: 1 — стальная игла, 2 — образец SmS, 3 — индиевый контакт. б) Зависимость тока, протекающего через контакт иглы с образцом, от величины приложенной к ней силы при повышении (1) и понижении (2) нагрузки.

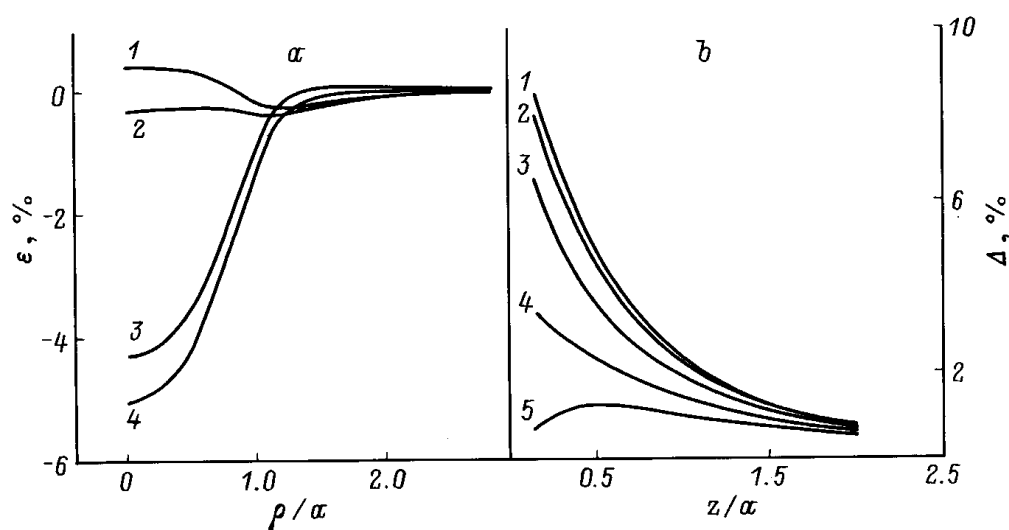


Рис. 3. Деформации в полупроводнике при надавливании на его поверхность стальным сферическим индентором с $R = 36 \mu\text{m}$ в кристаллографическом направлении [100] с силой $F = 0.4 \text{ N}$. *a*) Распределение компонент тензора деформации в плоскости, параллельной поверхности образца, лежащей на глубине $z = 0.4a$: 1, 2 — ϵ_{xx} , 3, 4 — ϵ_{zz} ; 1, 3 — Si, 2, 4 — SmS. *b*) Изменение объема деформируемой области SmS в зависимости от глубины z и расстояния от оси приложения силы ρ ; ρ : 1 — 0, 2 — $0.3a$, 3 — $0.6a$, 4 — $0.9a$, 5 — $1.2a$. $a = 5 \mu\text{m}$.

Полученные результаты дают основание считать, что аналогичная данному эксперименту ситуация возникает и при индуцировании фазового перехода SmS в металлическое состояние путем полировки его поверхности. При этом роль сферических инденторов играют твердые частицы полирующей пасты или порошка. Их малые размеры (порядка нескольких микрон) позволяют создавать необходимые для возникновения фазового перехода величины давлений и деформаций при приложении сил F , на два порядка меньших, чем в данном эксперименте. В [9] было отмечено, что по своим электрическим свойствам металлическая фаза SmS, полученная полировкой, похожа на фазу SmS, полученную при гидростатическом сжатии объемного образца давлениями выше 2 GPa. Расчет показывает, что при полировке вполне вероятны деформации и изменения объема материала, соответствующие даже таким большим давлениям.

- [7] В.В. Каминский, А.В. Рябов, Н.Н. Степанов. ФТТ **23**, 6, 1805 (1981).
 [9] A. Chatterjee, A. Jayaraman, S. Ramaseshan, A.K. Singh. Acta Cryst. **28A**, S4, 243 (1972).
 [9] А.А. Виноградов, В.В. Каминский, И.А. Смирнов. ФТТ **27**, 4, 1121 (1985).

Список литературы

- [1] В.П. Жузе, А.В. Голубков, Е.В. Гончарова, Т.И. Комарова, В.М. Сергеева. ФТТ **6**, 1, 268 (1964).
 [2] И.А. Смирнов, В.С. Оскотский. УФН **124**, 2, 241 (1978).
 [3] Н.М. Володин, В.В. Каминский. А.с. СССР № 311357 (25.04.1985).
 [4] Б.И. Смирнов, А.В. Голубков, И.А. Смирнов. ФТТ **18**, 7, 2097 (1976).
 [5] А.Л. Полякова. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов. Энергия, М. (1979). 168 с.
 [6] В.В. Каминский, В.А. Капустин, И.А. Смирнов. ФТТ **22**, 12, 3568 (1980).