

В области напряжений  $1.8 < U_G < 2.5$  В ток стока линейно зависит от напряжения на затворе. Этот участок описывается выражением [8]

$$g^* = \frac{\partial I_D}{\partial U_G} \Big|_{U_D = \text{const}} = \frac{Z}{L} \mu_n^* C_i U_D. \quad (4)$$

На линейном участке для данного образца крутизна  $g^* = 0.6$  мА/В<sup>2</sup>. При напряжениях  $U_G < 1.8$  В и  $U_G > 2.5$  В зависимость нелинейна.

Пороговое напряжение  $U_T$ , полученное экстраполяцией линейного участка передаточной характеристики к нулю тока стока, положительно и равно примерно 1.5 В. Таким образом, созданные МТДП транзисторы относятся к обогащенному типу.

При отрицательных смещениях на затворе и напряжении на стоке 10 мВ ток стока составляет около 30 нА.

Параметры границы раздела  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  определялись из вольт-фарадных характеристик. Напряжение плоских зон получено равным  $-0.25$  В, плотность поверхностных состояний вблизи середины запрещенной зоны  $(2\div 3) \times 10^{11}$  см<sup>-2</sup>·эВ<sup>-1</sup>, плотность медленных поверхностных состояний  $\sim 10^{10}$  см<sup>-2</sup>, плотность положительного встроенного заряда  $(3\div 5) \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup>. При нулевом напряжении на затворе для такого встроенного заряда инверсный канал между стоком и истоком отсутствует.

Эффективная подвижность в приповерхностном слое вычислялась из значения крутизны. На линейном участке она оказалась равной  $7 \cdot 10^3$  см<sup>2</sup>/В·с. При больших напряжениях на стоке подвижность убывает. Это связано с тем, что с ростом поперечного электрического поля толщина слоя объемного заряда становится малой, образуется двумерный электронный газ и основным механизмом рассеяния становится рассеяние на приповерхностном потенциальном рельефе. При этом рассеяние возрастает с уменьшением толщины слоя. При поперечном поле  $8 \cdot 10^4$  В/см, соответствующем напряжению на затворе  $U_G \simeq 0.7$  В, подвижность падает до  $10^3$  см<sup>2</sup>/В·с.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Kolodny A., Shacham-Diamand Y., Kidron I. — IEEE Trans. Electron. Dev., 1980, v. ED-27, N 3, p. 591—595.
- [2] Nemirovsky Y., Margalit S., Kidron I. — J. Appl. Phys., 1980, N 6, p. 466—468.
- [3] Williams J. M., Gertner E. R. — Electron. Lett., 1980, v. 16, N 22, p. 839—840.
- [4] Schiebel R. A. — In: Proc. IEDM. Washington, 1983, p. 711—714.
- [5] Пономаренко В. П., Шиманский И. В., Стафеев В. И. — ФТП, 1988, т. 22, в. 1, с. 62—65.
- [6] Sakamoto K., Okabe Y. — Japan. J. Appl. Phys., 1986, v. 25, N 3, p. 444—463.
- [7] Ashley T., Crimes G., Elliot C. T., Harker A. T. — Electron. Lett., 1986, v. 22, N 11, p. 611—613.
- [8] Зп С. Физика полупроводниковых приборов, т. 1. М., 1984. 456 с.

Получено 12.08.1987  
Принято к печати 15.01.1988

ФТП, том 22, вып. 6, 1988

### ДВУХЭЛЕКТРОННЫЕ ЦЕНТРЫ ОЛОВА В $\text{In}_2\text{S}_3$

Регель А. Р., Серегин П. П., Насрединов Ф. С.,  
Агзамов А. А.

Впервые электрическая активность двухэлектронных центров была обнаружена для примесных атомов олова в халькогенидах свинца [1]. Попытки обнаружить аналогичные центры в  $\text{In}_2\text{Te}_3$  и  $\text{Ga}_2\text{Te}_3$  были безуспешными: олово в этих полупроводниках оказывалось электрически не активным [2, 3]. В данной

работе двухэлектронные центры олова идентифицированы в  $\text{In}_2\text{S}_3$  и продемонстрирована их электрическая активность.

Использовались монокристаллические образцы, выращенные газотранспортным методом в парах иода [4]. В качестве источника использовались поликристаллы  $\text{In}_2\text{S}_3$ , стехиометрические или легированные 0.05, 0.25 и 0.5 ат% олова. Образцы были однофазными и имели структуру  $\beta$ -модификации. Электропроводность измерялась четырехзондовым методом в интервале температур 150–300 К. Мессбауэровские спектры  $^{119}\text{Sn}$  снимались с источником  $\text{Ca}^{119m}\text{SnO}_3$ .

Температурная зависимость электропроводности образцов, выращенных из стехиометрического источника, описывается двумя экспонентами с энергиями активации 0.45 и 0.20 эВ (рис. 1, а).

Легирование образцов оловом приводит к резкому увеличению электропроводности, причем для таких образцов энергия активации равна 0.1 эВ

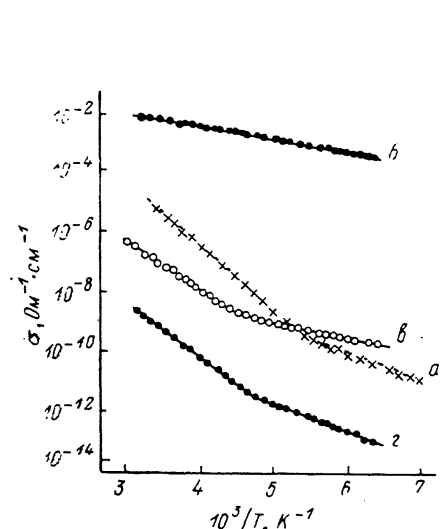


Рис. 1. Температурные зависимости электропроводности  $\text{In}_2\text{S}_3$  (а),  $\text{In}_2\text{S}_3 + 0.5$  ат% Sn (б),  $\text{In}_2\text{S}_3$  после отжига в парах серы (в),  $\text{In}_2\text{S}_3 + 0.5$  ат% Sn после отжига в парах серы (г).

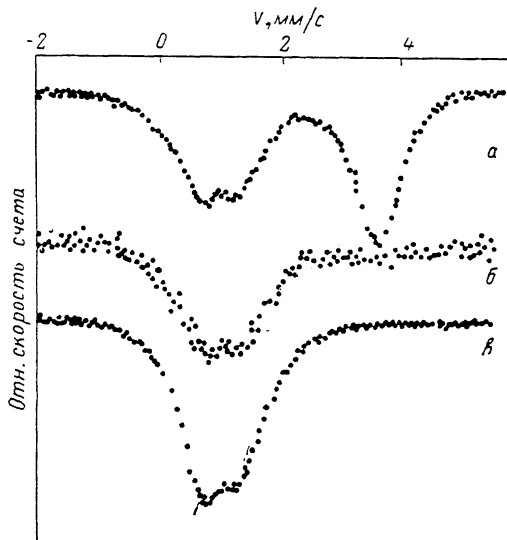


Рис. 2. Мессбауэровские спектры при 80 К примесных атомов  $^{119}\text{Sn}$  образцов  $\text{In}_2\text{S}_3 + 0.5$  ат% Sn (а),  $\text{In}_2\text{S}_3 + 0.05$  ат% Sn (б) и  $\text{In}_2\text{S}_3 + 0.5$  ат% Sn после отжига в парах серы (в).

(рис. 1, б). Мессбауэровские спектры отвечают двум состояниям олова (рис. 2, а):  $\text{Sn}^{2+}$  (одиночная линия с изомерным сдвигом  $3.67 \pm 0.02$  мм/с) и  $\text{Sn}^{4+}$  (дублет с изомерным сдвигом 1.13 мм/с и квадрупольным расщеплением  $0.55 \pm 0.03$  мм/с). Величины изомерных сдвигов свидетельствуют о том, что в ближайшем окружении олова находятся только атомы серы. Локальная симметрия центров  $\text{Sn}^{2+}$  является кубической, тогда как центры  $\text{Sn}^{4+}$  находятся в окружении, симметрия которого ниже кубической. Исходя из структурных данных для  $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$  (см., например, [1]), следует считать, что центры  $\text{Sn}^{2+}$  занимают тетраэдрические позиции, а центры  $\text{Sn}^{4+}$  — октаэдрические позиции. Относительная интенсивность спектров  $\text{Sn}^{2+}$  и  $\text{Sn}^{4+}$  зависит от общей концентрации олова, и для образца, содержащего 0.05 ат% олова, спектр отвечает присутствию только  $\text{Sn}^{4+}$  (рис. 2, б).

Отжиг  $\text{In}_2\text{S}_3$  в парах серы (700 °С, 3 ч) приводит к изменению как электропроводности, так и энергии активации (0.33 и 0.12 эВ) (рис. 1, в). Эти результаты согласуются с данными [4] для  $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ , полученного аналогичным методом. Отжиг легированных образцов в парах серы сопровождается уменьшением величины электропроводности до значений, меньших, чем у нелегированных образцов, причем наблюдаются две энергии активации (0.32 и 0.20 эВ) (рис. 1, г). Одновременно отжиг приводит к исчезновению в мессбауэровском спектре линии, отвечающей  $\text{Sn}^{2+}$  (рис. 2, в).

Таким образом, примесь олова оказывает влияние на электропроводность  $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$  (в отличие от таких примесей, как медь, кадмий и фосфор, которые ока-

зываются электрически не активными в  $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$  [4]). Это влияние является результатом как действия самих примесных атомов олова, так и нарушения стехиометрии кристалла при введении в него олова (последнее следует из зависимости электропроводности легированных кристаллов от отжига в парах серы).

Поскольку заряды двух состояний олова в  $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$  различаются на  $2e$  и оба состояния наблюдаются одновременно в одном образце, можно было бы предположить, что олово в  $\text{In}_2\text{S}_3$  образует двухэлектронные центры с отрицательной энергией Хаббарда, подобные центрам олова в халькогенидах свинца [1]. Однако такой интерпретации противоречит тот факт, что ионы  $\text{Sn}^{2+}$  и  $\text{Sn}^{4+}$  находятся в решетке  $\text{In}_2\text{S}_3$  в различных кристаллографических положениях. Правильнее считать тетраэдрические центры  $\text{Sn}^{2+}$  однократно ионизованными акцепторами, а октаэдрические центры  $\text{Sn}^{4+}$  — однократно ионизованными донорами. Степень ионизации примесных центров олова определяется при этом относительно ионов  $\text{In}^{3+}$  в тех же положениях. Равновесие между центрами  $\text{Sn}^{2+}$  и  $\text{Sn}^{4+}$  устанавливается при росте или при высокотемпературной обработке кристаллов. Уменьшение концентрации олова в  $\text{In}_2\text{S}_3$  или отжиг  $\text{In}_2\text{S}_3\langle\text{Sn}\rangle$  в парах серы приводит к уменьшению концентрации анионных вакансий, являющихся донорами, и, как следствие, к росту концентрации ионизованных донорных центров олова. Указанные свойства примесных центров олова в  $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$  позволяют рассматривать их в качестве кристаллических аналогов заряженных дефектов  $C_1^-$  и  $C_3^+$ , предложенных в [5] для описания электрических свойств халькогенидных стекол.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Насрединов Ф. С., Прокофьева Л. В., Серегин П. П. — ЖЭТФ, 1984, т. 87, в. 3, с. 951—959.
- [2] Серегин П. П., Насрединов Ф. С., Нистирюк П. В., Регель А. А., Костиков Ю. П. — ФТП, 1982, т. 16, в. 2, с. 227—230.
- [3] Насрединов Ф. С., Подхалюзин В. П., Чирнер Х. У., Рентч Р., Борн Т. — ФТП, 1986, т. 20, в. 7, с. 1166—1173.
- [4] Rehwald W., Harbeker G. — J. Phys. Chem. Sol., 1965, v. 26, N 7, p. 1307—1324.
- [5] Kastner M., Adler D., Fritzsche H. — Phys. Rev. Lett., 1976, v. 37, N 22, p. 1504—1507.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Получено 5.01.1988  
Принято к печати 15.01.1988

ФТП, том 22, вып. 6, 1988

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЕГИРОВАННЫХ ГЕРМАНИЕМ МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ, ПОДВЕРГНУТЫХ ТЕРМООБРАБОТКЕ

Дашевский М. Я., Корляков Д. Н., Миляев В. А., Никитин В. А.

В настоящее время значительное число работ посвящено изучению поведения германия (изовалентная добавка) в кремнии [1-15]. В работах [1-4] показано, что введение германия в кремний замедляет формирование термодоноров (так называемых первых термодоноров) при термообработке ( $T=450^\circ\text{C}$ ). В работах [5, 6] указывается, что изовалентные примеси влияют на подвижность основных носителей заряда, снижая ее. В то же время в [3] предполагается, что германий, находясь в решетке термообработанного при  $450^\circ\text{C}$  кремния в виде комплексов, может выступать геттером, повышая подвижность основных носителей в термообработанном кремнии.

Целью данной работы является изучение термостабильности ряда параметров легированных изовалентной добавкой (германием) монокристаллов кремния.