

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АМОРФНЫХ ПЛЕНОК ТВЕРДОГО РАСТВОРА



Б. А. НАДЖАФОВ

Сектор радиационных исследований АН Азербайджана  
Баку 370143, пр. Г. Джавида, 31 "А".

Аморфные плёнки твёрдого раствора  $\text{Ge}_{0,90}\text{Si}_{0,10}:\text{Hx}$  ( $x = 1,3 \pm 23,7$  ат.%) были получены в атмосфере с различными парциальными давлениями водорода до толщины  $0,5 \pm 1,0 \mu\text{m}$  методом плазмохимического осаждения. Скорость осаждения составляла  $0,3 \pm 0,5 \text{ \AA}/\text{с}$ . Измерения электропроводности плёнок проведены в температурной области от 100 до 420 К. Также измерена темновая проводимость ( $\sigma_T$ ) плёнки, при температуре 100 К рассчитаны энергия активации прыжка ( $E$ ), длина прыжка ( $R$ ), подвижность ( $\mu_F$ ,  $\mu_C$ ) электронов на уровнях  $\varepsilon_F$  и  $\varepsilon_e$ , а также энергия активации проводимости  $\Delta E$ .

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы проявляется большой интерес к аморфным твёрдым растворам германия с кремнием. Это в основном вызвано перспективностью их использования в полупроводниковой электронике.

Гидрогенизированные аморфные твёрдые растворы ( $\text{Ge}:\text{Si}$ ): Н обладают оптимальной шириной запрещенной зоны ( $1,1 \pm 1,85$ ) эВ для преобразования солнечной энергии в электрическую и лучшими оптоэлектронными свойствами в длинноволновой части видимого спектра, а также являются термодинамически более стабильными и радиационно стойкими по сравнению с другими аморфными материалами. Это позволяет использовать их для создания солнечных элементов [1,3]. Имеется ряд работ [4,6] посвященных изучению электрических свойств гидрогенизированных аморфных плёнок  $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x:\text{H}$ . Однако, сплавы с малым содержанием кремния изучены слабо, хотя и представляют значительный интерес в инфракрасной и ближней видимой части спектра. Настоящая работа посвящена исследованию влияния концентрации водорода на электрические свойства аморфных плёнок  $\text{Ge}_{0,90}\text{Si}_{0,10}:\text{Hx}$ . Известно, что аморфные плёнки  $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$  без гидрогенизации обладают довольно высокой плотностью состояний в запрещенной зоне. Чтобы уменьшить количество этих состояний в плёнки добавляют водород или получение плёнки осуществляют в водородной среде.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Плёнки а -  $\text{Ge}_{0,90}\text{Si}_{0,10}:\text{Hx}$  были получены методом плазмохимического осаждения (в физико-технического института имени А.Ф.Иоффе АН России). Мишенью служили пластинки кристаллического сплава  $\text{Ge}_{0,90}\text{Si}_{0,10}$  диаметром 60 – 63 мм. Осаждение материала на подложку производили в атмосфере водорода при различных давлениях. На основе проведенных исследований определены оптимальный режим распыления и гидрогенизации материала. Температура подложки ( $\text{NaCl}$ ) составляла 420 К, скорость осаждения материала на подложку была  $\sim 0,3 \pm 0,5 \text{ \AA}/\text{с}$ , а расстояние между мишенью и подложкой  $l \approx 25$  см. Нарастивание плёнок производилось примерно в течение одного часа. Напряженность электрического поля при измерениях не превышала  $10^3 \text{ В}/\text{см}$ . В качестве источника света использовалась лампа накаливания мощностью излучения  $\approx 90 \text{ мВт}/\text{см}^2$ . Коэффици-

ент поглощения ( $\beta$ ) в изученном интервале энергии фотонов достигал  $10^4 \text{ см}^{-1}$  [4]. Величина  $\varepsilon_C - \varepsilon_V$  изменялась в зависимости от концентрации водорода в интервале  $0,83 \pm 1,17$  эВ, которая связана с уменьшением плотности локализованных состояний в щели подвижности. Аморфность плёнок а -  $\text{Ge}_{0,90}\text{Si}_{0,10}:\text{H}$  контролировалась электро-нографическими исследованиями. Толщина плёнок а -  $\text{Ge}_{0,90}\text{Si}_{0,10}:\text{Hx}$  составляла  $0,5 \pm 1,0 \mu\text{m}$  и определялась интерференционным методом [7]. Концентрация водорода в плёнках вычислялась методом эффузии и с помощью спектров поглощения [8, 9] и составляла от 1,3 до 23,7 ат.%.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Измерение температурной зависимости электропроводности в изучаемом интервале показывает, что  $\sigma(T)$  имеет две области. Низкотемпературный участок определяется прыжковой проводимостью по локализованным состояниям в зазоре подвижности, о чём свидетельствует линейная зависимость  $\lg \sigma$  от  $T^{-1/4}$  (рис.1).

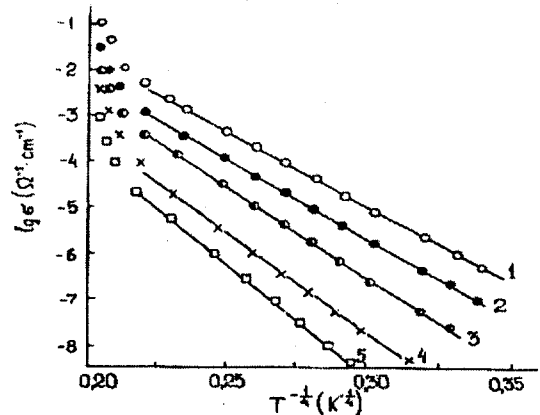


Рис.1. Температурные зависимости темновой проводимости  $\sigma(T)$  от  $T^{-1/4}$  аморфных пленок а -  $\text{Ge}_{0,90}\text{Si}_{0,10}:\text{Hx}$ . X(ат.%) - 1,3 (1), 5,1 (2), 8,7 (3), 14,2 (4) и 23,4 (5)

Высокотемпературный участок  $\sigma(T)$  определяется зонной проводимостью и описывается известной формулой

$$\sigma_T = \sigma_0 \exp(-\Delta E / kT) \tag{1}$$

$$\sigma_0 = \text{const} \frac{e^2}{\hbar \alpha} \text{ и выше при } T=300 \text{ К.}$$

Принимая  $const = 0,026$  и  $\alpha = 8\text{ \AA}$ , тогда получаем  $\sigma_0 = 750\text{ Ом}^{-1}\text{ см}^{-1}$ .  $\Delta E$  для электронов характеризуется  $\Delta E = E_C - E_F$ , где  $e$  - заряд электронов,  $\hbar$  - постоянная Планка,  $\alpha$  - константа затухания волновой функции электронов в локализованных состояниях [10]. Во всех исследованных интервалах температур с ростом содержания водорода в плёнке электропроводность уменьшается. Изменение электропроводности с ростом содержания водорода на высокотемпературном участке обусловлено увеличением плотности состояний у потолка валентной зоны, а на низкотемпературном участке это может быть следствием уменьшения как подвижности носителей заряда в локализованных состояниях, так и плотности состояний вблизи уровня Ферми ( $\varepsilon_F$ ).

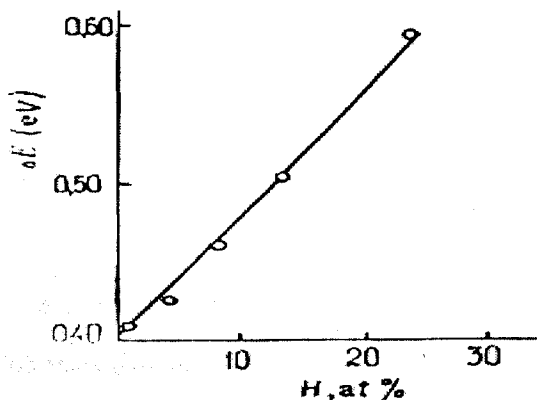


Рис.2. Зависимость энергии активации  $\Delta E$  от концентрации водорода для аморфных пленок  $\text{Ge}_{0,90}\text{Si}_{0,10}:\text{H}_x$

При сравнительно низких температурах наблюдается переменная энергия активации, что интерпретируется как выполнение закона Мотта [10].

$$\sigma = \sigma_1 \exp\left[(-T_0/T)^{1/4}\right] \quad (2)$$

где

$$T_0 = \left[18\alpha^3/kN(\varepsilon_F)\right]^{1/4} \quad (3)$$

Здесь  $\sigma_1$  - проводимость пленки при температуре абсолютного нуля и для определения использовалась экстраполяция зависимостей  $\lg \sigma$  от  $T^{1/4}$ ,  $k$  - постоянная Больцмана,  $N(\varepsilon_F)$  - плотность состояний на уровне Ферми ( $\varepsilon_F$ ). Как известно [10,12], в большинстве аморфных материалов константа  $\alpha = 10\text{ \AA}$  и плотность состояний  $N(\varepsilon_F)$  составляют  $\approx 2 \cdot 10^{19}\text{ см}^{-3}\text{ эВ}^{-1}$  и  $2 \cdot 10^{18}\text{ см}^{-3}\text{ эВ}^{-1}$  соответственно. Анализ экспериментальных данных по эффекту поля также с помощью ЭПР исследования [4,15,16] показывает, что в плёнках  $\text{Ge}_{0,90}\text{Si}_{0,10}:\text{H}_x$  полученных плазмохимическим осаждением  $N(\varepsilon_F) = 7 \cdot 10^{20} - 10^{19}\text{ см}^{-3}\text{ эВ}^{-1}$  (где концентрация парамагнитных центров  $N_S = \chi N(\varepsilon_F) kT$ ). Исследование показало, что в образцах аморфных плёнок  $\text{Ge}_{0,90}\text{Si}_{0,10}:\text{H}_x$  ( $x = 1,3+23,7$  ат. %) наблюдается довольно интенсивный ЭПР сигнал, свидетельствующий о наличии высокой концентрации оборванных связей, которые стабилизируют неупорядоченные структуры;

причём с ростом содержания водорода от 1,3+23,7 ат. % в плёнке плотность парамагнитных центров уменьшается от  $N_S = 2 \cdot 10^{19} - 3 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}\text{ эВ}^{-1}$  [4,6]. Это дает основание предположить, что при введении в плёнку до 23 ат. % водорода происходит залечивание оборванных связей, которое приводит к уменьшению плотности локализованных состояний в запрещенной зоне. Таким образом, уменьшение электропроводности плёнок с ростом содержания водорода при низких температурах в основном обусловлено изменением плотности состояний вблизи уровня Ферми. На основании выше указанных параметров установлено, что в плёнке а -  $\text{Ge}_{0,90}\text{Si}_{0,10}$  проводимость  $\sigma_T(300)$  падает от  $10^{-2}$  до  $10^{-7}\text{ Ом}^{-1}\text{ см}^{-1}$ . С использованием литературных данных [10,13] а также других параметров плёнки можно оценить энергию активации и длину прыжка ( $E, R$ ) и также подвижность электронов  $\mu_F, \mu_C$  на уровнях  $\varepsilon_F$  и  $\varepsilon_C$ . При температуре 100 К энергия активации прыжка рассчитана по следующей формуле.

$$E = \frac{2}{3} \alpha R k T = \left(T_0/3\pi^{1/4}\right) T^{3/4} \quad (4)$$

Длина прыжка

$$\equiv R = \left[9/8\pi\alpha N(\varepsilon_F)kT\right]^{1/4} \quad (5)$$

Отсюда найдено, что в зависимости от концентрации водорода при температуре 100 К  $R = 110 \div 150\text{ \AA}$  Соответственно находим

$$E = \left(0,03 \div 0,012 T^{3/4}\right) \text{ эВ}$$

Как известно [9,10]

$$\sigma = \mu_C N(\varepsilon_C) e k T \exp\left\{-\frac{\varepsilon_C - \varepsilon_E}{kT}\right\} \quad (6)$$

$\sigma$  - была определена при фиксированной температуре ( $T=100\text{ К}$ ) из зависимости  $\sigma(T) \sim 1/T$  и равна  $10^{-3} \div 10^{-8}\text{ Ом}^{-1}\text{ см}^{-1}$ .

Где  $N(\varepsilon_C)$  - плотность состояний у края в интервале  $kT$ , которая в нашем случае  $N(\varepsilon_C) = 10^{21}\text{ см}^{-3}\text{ эВ}^{-1}$  [12,10]. Тогда подвижность на уровнях  $\varepsilon_C$  можно определить из уравнения (6) в следующем виде

$$\mu_C = \frac{\sigma}{eN(\varepsilon_C)kT} \exp\left\{-\frac{\varepsilon_C - \varepsilon_F}{kT}\right\} \quad (7)$$

Аналогично, можно найти подвижность на уровнях Ферми, так как при  $E_C = E_F$ ,  $\sigma = \sigma_0$ ;  $\sigma_0$  - была определена с помощью уравнения (1).

В результате получается из (7) следующее выражение:

$$\mu_F = \frac{\sigma_0}{eN(\epsilon_F)kT} \quad (8)$$

Так как в зависимости от концентрации водорода указанные параметры изменяются в пределах

$$\mu_F = (10^{-2} \div 10^{-4}) \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$$

$$\mu_C = (3 \div 9) \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$$

Таким образом можно констатировать, что варьируя концентрацию водорода в плёнке  $a - Ge_{0,90}Si_{0,10}$ , можно в достаточно широких пределах изменять электрические, а также оптические свойства [4]. Выше комнатной температуры энергия активации электропроводности в зави-

симости от концентрации водорода составляет  $\Delta E = (0,41 \div 0,59)$  эв. Зависимость  $\Delta E$  от ширины запрещенной зоны ( $E_g \text{ opt.}$ ), измеренной оптическим методом, во всех исследованных плёнках можно аппроксимировать уравнением  $\Delta E = 0,5 E_g \text{ opt.}$ , что согласуется с известной для  $a-Ge:Si:H$ . Зависимость рассчитанной энергии активации от концентрации водородных атомов находящихся в плёнке в интервале температур  $300 \div 420$  К имеет линейный характер (рис.2).

Следует отметить, что параметры плёнок, полученных различными способами могут отличаться друг от друга, что и наблюдается в наших экспериментах [12,14]. Полученные результаты представляют интерес для создания солнечных элементов и инфракрасных приёмников излучения на основе  $a-Ge:Si:H$ .

- [1] G. Nakamura, K. Sato, K. Shiranata and K. Fujivara. Japan. J. Appl. Phys., 1981, V, 20, p. 291-296
- [2] R. Dutta, P.K. Banerjee and S. S. Mitra. Non - Crystall. Solids, 1983, V. 55, p. 148-157
- [3] Ф. С. Насреддинов, А.А. Андреев, О.А. Голикова, А.Н. Курмантаев, П.П. Серегин. ФТП, 1983 Т, 15, в. 10, с.1871-1873
- [4] B.A. Najafov, M.Ya Bakirov and V.S. Mamedov. Phys. Stat. Sol. (a), 1991, №123 k. 67-71.
- [5] А.Ф. Хохлов, А.И. Машин, А.В. Ершов, Н.И.Машин, Е.В.Ларина. ФТП, 1985, т. 19, в. 12, с.2204 - 2208.
- [6] Б.А. Наджафов, Н. Я. Бакиров, В.С.Мамедов, Докл. Акад. Наук Азербайджана, 1989, т. XIV, №2, с.30-35.
- [7] А.В.Раков. "Спектрофотометрия тонких плёнок", М." Наука " 1975, С. 175
- [8] H. Shank, L. Ley, M. Cardona, F.J. Demond and S.Kalbitzer. Phys. Stat. Sol. (b), 1980, v.100 № 43. p.17-29
- [9] Y. Catherine and G. Turban. Thin Solid Films, 1980, v. 70, №101, p. 107-115
- [10] Н. Момм, Э. Девис. В кн "Электронные процессы в некристаллических веществах", " Мир ", 1982 с. 662.
- [11] M. Szpilka, P. Visser. Philosophical Magazine (B), 1982, v. 45, p.485-496
- [12] А.А. Андреев, О.А. Голикова, М.М. Казанин, М.М. Мездрогина, ФТП, 1986, т. 14, в. 12, с.53 - 55
- [13] S.K. Bahl, S.M. Bhagat. Journal of Non-Crystalline Solids. 1983, v. 17, p-409 - 427
- [14] M. Ya. Bakirov, B.A. Najafov. and V. S. Mamedov, R.S. Madatov. Phys. Stat. Sol. (a), 1989, v.114 k.45-49
- [15] R.J. Loveland, W.E.Spear, A.Al.Sherbaty. Journal of Non-Crystalline Solids. 1973 / 74, N13, p.55-68
- [16] Дж. Джоунпулоса и Дж. Люковски в кн : "Физика гидрогенизированного аморфного кремния", "Мир", 1988, с. 447

B.F. Nəcəfov

### $Ge_{0,9}Si_{0,10}:Hx$ ( $x=1,3 \div 23,7$ at %) BƏRK MƏHLULUN AMORF TƏBƏQƏSİNİN ELEKTRİK XASSƏSİ

$Ge_{0,9}Si_{0,10}:Hx$  bərk məhlulun amorf təbəqəsi ( $x=1,3-23,7$  at%)  $0,5-1,0$  m qalınlığında hidrogenin müxtəlif atmosfer təzyiqlərində plazma-kimyəvi metodla alınmışdır. Təbəqənin elektrik keçirməsi  $100$  və  $420$  K temperaturda müxtəlif temperatur oblastında aparılmışdır.

Həmçinin təbəqənin qaranlıq elektrik keçirməsi ( $\sigma_q$ )  $T=100$  K temperaturda tullanmanın aktivləşmə enerjisi ( $E$ ), tullanma məsafəsi ( $R$ ),  $\epsilon_c$  və  $\epsilon_F$  səviyyələrində elektronun ( $\mu_F, \mu_C$ ) enerjisi, həmçinin keçiriciliyin  $\Delta E$  aktivləşmə enerjisi ölçülmüşdür.

B.A. Najafov

### THE ELEKTRICAL PROPERTIES OF THE AMORFOUS FILMS OF SOLID SOLUTION $Ge_{0,90}Si_{0,10}:Hx$

The amorphous films of solid solution  $Ge_{0,90}Si_{0,10}:Hx$  ( $x=1,3 \div 23,7$  am %) are formed in atmosphere with different portions of hydrogen pressures till the thickness  $0,5 \div 1,0$   $\mu m$  by the method of plasma-chemical precipitation. The measurements of the film electro-conductions are carried out at temperature interval  $100 \div 420$  K. The dark-conduction ( $\sigma_T$ ) of film is measured too, at the temperature  $100$  K. It was calculated the energy of activation of the jump ( $E$ ), length of the jump ( $R$ ), mobility ( $\mu_R, \mu_C$ ) of the electrons on the levels  $\epsilon_R$  and  $\epsilon_C$ , and energy of activation of conduction  $\Delta E$ .

Дата поступления: 24.03.2000

Редактор: М.И. Алиев