

## К ИССЛЕДОВАНИЮ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СТЕКЛООБРАЗНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ РАДИОФИЗИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Ю. Е. Гордиенко, Ю. А. Дудкин

Харьков

Изложенный в работах [1,2] принцип применения техники СВЧ для изучения кристаллизации аморфных слоев селена может быть положен в основу радиофизического метода количественного фазового анализа стеклообразных полупроводников. Последние представляют очень большой класс полупроводниковых материалов, широко используемых в технике преобразования и регистрации излучения. Физико-электрические свойства этих материалов в значительной мере определяются степенью их частичной кристаллизации и неравновесностью стеклообразного состояния. В связи с этим исследование особенностей их кристаллизации имеет не только познавательный, но и практический интерес.

Проведенный ниже анализ позволяет количественно оценить чувствительность радиофизического метода таких исследований в каждом конкретном случае и оптимальные условия реализации максимального ее значения.

Считая исследуемый образец стеклообразного полупроводника с кристаллическими включениями гетерогенной системой [3], можно показать, что изменение его проводимости на частоте, лежащей выше области Максвелл-Вагнеровской дисперсии, следующим образом связано с изменением концентрации кристаллических включений:

$$\Delta\sigma = \frac{9\varepsilon_1^2}{(\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1)^2} \sigma_2 - \sigma_1 \Delta C, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_1$ ,  $\sigma_1$  — относительная диэлектрическая проницаемость и проводимость аморфной матрицы на указанной частоте;

$\varepsilon_2$ ,  $\sigma_2$  — соответствующие электрические параметры кристаллических включений на этой же частоте;

$\Delta C$  — изменение концентрации включений в процессе кристаллизации образца.

При этом предполагалось, что  $\varepsilon_1$  мало отличается от  $\varepsilon_2$ , благодаря чему слагаемыми вида  $C \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_1}$  можно пренебречь.

Если исследуемый образец кристаллизуется в измерительном резонаторе [2], то это приводит к изменению добротности последнего, которое может быть определено по изменению напряжения на СВЧ детекторе, регистрирующем прошедшую через резонатор мощность. В случае линейного СВЧ детектора

$$\Delta U = \frac{2\beta}{1+2\beta} \cdot \frac{\Delta Q/Q \sqrt{P_g G R_d}}{1+2\beta \left(1 - \frac{\Delta Q}{Q}\right)}, \quad (2)$$

где  $\beta$  — коэффициент связи резонатора с волноводами;

$Q$  — добротность резонатора с исследуемым образцом в исходный момент;

$R_d$  и  $G$  — сопротивление и коэффициент преобразования СВЧ детектора;

$P_g$  — мощность СВЧ генератора, поступающая на вход резонатора.

Учитывая, что

$$\beta = \beta_0 Q / Q_0; \quad (3)$$

$$Q^{-1} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{2} \eta \varepsilon_1 \operatorname{tg} \delta_1; \quad (4)$$

$$\Delta Q / Q = \left[ \frac{2\omega_0 \varepsilon_0}{Q h \Delta \sigma} + 1 \right]^{-1}; \quad (5)$$

где  $\beta_0$ ,  $Q_0$  — коэффициент связи и добротность пустого резонатора;

$\eta = \frac{\int_{V_s} E^2 dV_s}{\int_{V_r} E^2 dV_r}$  — коэффициент заполнения поля резонатора исследуемым образцом,

$$\operatorname{tg} \delta_i = \frac{\sigma_i}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_i}.$$

Выражение (2) преобразуется к виду:

$$\Delta U = \frac{2\beta_0 \sqrt{P_g G R_d} Q_0 \eta \Delta (\operatorname{tg} \delta)}{\left(1 + 2\beta_0 + \frac{1}{2} \eta Q_0 \varepsilon_1 \operatorname{tg} \delta_1\right) \left[1 + 2\beta_0 + \frac{1}{2} \eta Q_1 \varepsilon_1 \operatorname{tg} \delta_1 + \eta Q \Delta (\operatorname{tg} \delta)\right]}. \quad (6)$$

Тогда чувствительность резонаторного СВЧ метода исследования кристаллизации стеклообразных материалов можно представить следующим выражением:

$$M = \frac{d(\Delta U)}{d(\Delta C)} = \frac{\beta_0 \sqrt{P_g G R_d} (K \varepsilon_2 \operatorname{tg} \delta_2 - \varepsilon_1 \operatorname{tg} \delta_1)}{\left[ (1 + 2\beta_0) (Q_0 \eta)^{-1} + \frac{1}{2} \Delta C K \varepsilon_2 \operatorname{tg} \delta_2 + \frac{1}{2} (1 - \Delta C) \varepsilon_1 \operatorname{tg} \delta_1 \right]^2} \eta Q_0 \quad (7)$$

из которого легко заметить, что величина ее уменьшается в процессе кристаллизации образца.

Анализ выражения (7) показывает, что максимального значения чувствительность метода достигает при

$$(Q_0 \eta)_{\text{опт}} = \frac{2(1 + 2\beta_0)}{\Delta C (K \varepsilon_2 \operatorname{tg} \delta_2 - \varepsilon_1 \operatorname{tg} \delta_1) + \varepsilon_1 \operatorname{tg} \delta_1}, \quad (8)$$

где  $K = \frac{9\varepsilon_1^2}{(\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1)^2}$ .

Если бы это соотношение выполнялось в любой точке процесса кристаллизации, чувствительность метода определялась бы выражением

$$M_{\Delta C} = \frac{\beta_0}{2(1 + 2\beta_0)} \sqrt{P_g G R_d} \frac{K \varepsilon_2 \operatorname{tg} \delta_2 - \varepsilon_1 \operatorname{tg} \delta_1}{\Delta C (K \varepsilon_2 \operatorname{tg} \delta_2 - \varepsilon_1 \operatorname{tg} \delta_1) + \varepsilon_1 \operatorname{tg} \delta_1}. \quad (9)$$

Однако при описанном в работе [2] способе измерения кинетики кристаллизации соотношение (8) выполняется только в какой-либо одной точке, а во всех остальных максимум чувствительности не реализуется.

Можно показать, что связанный с этим фактор потерь чувствительности, определяемый как

$$F = \frac{M_{\Delta C}}{M_0} - 1, \quad (10)$$

где  $M_0$  — чувствительность метода при выполнении соотношения (8) только в точке  $\Delta C = 0$ ; будет следующим образом зависеть от степени закристаллизованности образца:

$$F = \frac{1}{4} (\Delta C)^2 \left( K \frac{\epsilon_2 \operatorname{tg} \delta_2}{\epsilon_1 \operatorname{tg} \delta_1} - 1 \right)^2. \quad (11)$$

Чтобы избежать столь значительных потерь чувствительности, необходимо, изменяя  $Q_0$  или  $\eta$  удовлетворять соотношению (8) в каждой измеряемой точке процесса кристаллизации. Практически это удобнее осуществлять, изменяя положение образца в резонаторе (перемещая его из максимума электрического поля в область, где величина его уменьшается) до тех пор, пока напряжение на выходе СВЧ детектора, регистрирующего прошедшую через измерительный резонатор мощность, не станет равным

$$U_0 = \frac{1}{2} \frac{\beta_0}{1 + 2\beta_0} \sqrt{P_g R_d G}. \quad (12)$$

Тогда изменение концентрации кристаллических включений в образце за промежуток времени от установления оптимальных условий до времени отсчета можно определить из выражения

$$\Delta C_n = \frac{2\Delta U_n}{U_0} \left( \frac{\epsilon_1 \operatorname{tg} \delta_1}{K \epsilon_2 \operatorname{tg} \delta_2 - \epsilon_1 \operatorname{tg} \delta_1} + \sum_{n-1} \Delta C_i \right), \quad (13)$$

где  $n$  — порядковый номер отсчета;

$\Delta U_n = U_0 - U_n$  — изменение напряжения на выходе СВЧ детектора к моменту отсчета.

Этот прием не только позволяет исследовать кинетику кристаллизации образца реализуя в каждой точке максимум чувствительности метода, но также исключает ошибки, обусловленные неидеальностью характеристики СВЧ детектора.

Таким образом, пользуясь полученным здесь выражением (9) можно для любого материала по известным значениям  $\epsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$  аморфной и кристаллической фаз определить чувствительность СВЧ метода исследования кристаллизации такого материала.

Используя соотношение (8), можно выбрать оптимальную форму и размеры исследуемого образца, а также тип измерительного резонатора.

Так при исследовании пленочных материалов с существенной разницей в СВЧ проводимости кристаллической и аморфной фаз  $K \frac{\epsilon_2 \operatorname{tg} \delta_2}{\epsilon_1 \operatorname{tg} \delta_1} \gg 100$  целесообразно использовать цилиндрические резонаторы на волне  $H_{011}$ ,  $H_{111}$ ,  $E_{011}$ . Величина  $Q$  в них может быть достаточно велика, чтобы удовлетворить соотношению (8) для любых материалов, а плавность изменения электрического поля с координатой  $Z$  должна обеспечивать возможность реализации максимальной чувствительности в любой точке процесса кристаллизации.

При исследовании материалов с малой разницей в проводимости кристаллической и аморфной фаз, большим значением  $\epsilon \operatorname{tg} \delta$  на СВЧ, а также

при ограниченных размерах исследуемого образца целесообразно использовать тороидальный резонатор. Для такого резонатора параметр  $\eta$  при одних и тех же размерах образца значительно выше, чем для других.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Е. Гордиенко. Сб. «Радиотехника», вып. 10. Изд-во ХГУ, Харьков, 1968.
2. Ю. Е. Гордиенко, Ю. А. Дудкин, Н. А. Коваленко, А. Л. Горелик. Сб. «Приборы и системы автоматики», вып. 7. Изд-во ХГУ, Харьков, 1967.
3. Э. И. Трухан. «Физика твердого тела», 4, 11, 1962.