

## МОДИФИКАЦИЯ СВЧ-МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ УПОРЯДОЧЕННЫХ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЙ В АМОРФНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

ГОРДИЕНКО Ю.Е., ФАР Р.С.

Рассмотрены вопросы повышения чувствительности и локальности при исследовании частичной кристаллизации аморфных фотопроводящих слоев СВЧ-методом.

Современные средства оптической записи, хранения, преобразования и воспроизведения изображений используют фотоприемные среды на основе аморфных полупроводников, высоко полимерных смесей с фотоактивными включениями или гетерогенных слоистых структур [1, 2]. В процессе их технологического формирования и эксплуатации имеет место спонтанное или стимулированное различными факторами образование структурно упорядоченных микрообластей. Количественная их характеристика определяет многие эксплуатационные параметры. Это хорошо иллюстрируется примером спонтанной кристаллизации селеновых электрофотографических пластин и барабанов. Появление и рост гексагональной фазы в аморфных слоях Se вначале их сенсibiliзирует, а в дальнейшем уменьшает принимаемый заряд и время хранения изображения [1].

В работах [3, 4] была теоретически и экспериментально доказана эффективность СВЧ-метода исследования кинетики кристаллизации аморфных слоев селена для прогнозирования стабильности их эксплуатационных параметров и оптимизации технологии формирования. Развитие техники обработки изображений, применение новых материалов и структур, а также появление новых представлений о физике процессов, происходящих в таких фотоприемных средах, требует модификации СВЧ-метода диагностики. Основные ее направления связаны со следующими факторами и обстоятельствами.

1. Исследуемые в [3, 4] и других работах образцы специально приготавливались для размещения внутри СВЧ-резонатора. С этой целью слои Se наносились на диэлектрические подложки. Реальные структуры формируются на проводящих основаниях (алюминиевых, стальных и др.). В связи с этим переходные области могут быть существенно различными по фазовому составу и разным образом будут влиять на формирование и функционирование рабочего слоя. Поэтому для обеспечения СВЧ-исследований на реальных образцах необходимо разработать измерительные преобразователи (ИП) с их наружным расположением.

2. Часто очень важно иметь количественные представления о распределении случайных упорядоченных структурообразований по площади широкоформатных объектов. Для этого локальность СВЧ-измерений должна быть как можно более

высокой, сопоставимой с разрешающей способностью фотопроцесса.

3. Современные разработки новых фотоматериалов широко ориентированы на формирование слоисто-гетерогенных структур. Их прообразом может служить система: аморфный Se – гексагональный Se – металлическая подложка. Для СВЧ-исследования таких структур целесообразно иметь возможность изменять ориентацию электрической компоненты СВЧ-поля на  $90^\circ$  относительно плоскости образца.

4. В предыдущих работах не было предусмотрено исключение таких влияющих на процесс измерения факторов, как отклонения геометрии и положения образца от нормы, неидеальности характеристики СВЧ-детектора, долговременной нестабильности мощности задающего СВЧ-генератора.

Учитывая широкую и эффективную практику использования СВЧ-резонаторных ИП с емкостной измерительной апертурой для контроля электропроводности полупроводников [5, 6], рассмотрим их применение для решения обозначенных выше задач. На рис. 1 представлено схематическое изображение двух вариантов взаимодействия таких

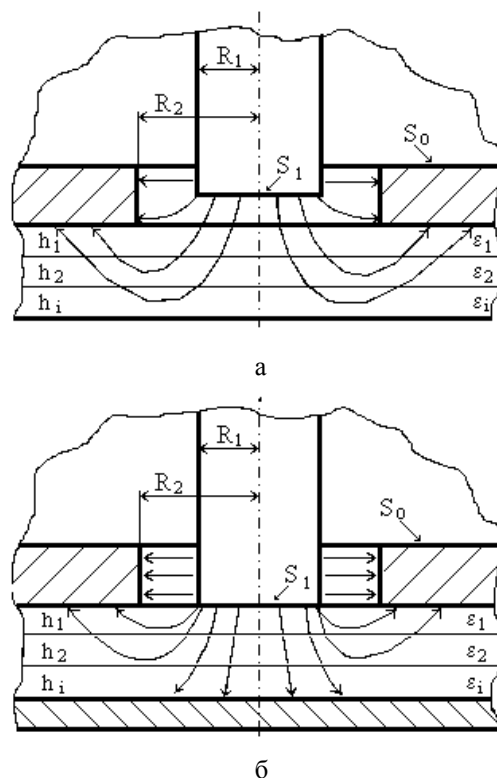


Рис. 1. Схематическое изображение СВЧ ИП

ИП со слоистыми полупроводниковыми структурами.

Нетрудно видеть, что рассматриваемый ИП обеспечивает наружное расположение образца, возможность существенно повысить локальность по сравнению с резонатором на  $H_{01n}$  виде колебаний [3, 4] и возможность управлять геометрией электрического поля в образце в некоторых пределах. Последнее утверждение качественно аргументируется известным фактом, что "провисание" электромагнитного поля соизмеримо с линейными раз-

мерами отверстия [6]. Следовательно, удаляя центральный проводник от края внутрь резонатора, при незранирующей структуре образца (рис. 1, а) можно реализовать случай с преобладанием составляющей электрического поля, тангенциальной плоскости образца. А при экранировании слоистого образца закорачивающей металлической пластинкой и компланарной коаксиальной структуре измерительного отверстия (рис. 1б) – случай преобладания нормального компонента.

Для строгого теоретического исследования характеристик таких ИП можно воспользоваться алгоритмом решения соответствующей электродинамической задачи, описанной в [7]. Он базируется на решении интегрального уравнения, вытекающего из граничных условий для тангенциальных компонент поля на границах отверстия  $S_0$  и  $S_1$ . При этом магнитное поле соответствующей моды на  $S_1$  связывается с электрическим соотношением:

$$H_{\varphi} = j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_1 \int_0^{\infty} J_1(\chi' r) A_1(\chi, \tilde{\varepsilon}_1, \omega) \int_{R_2}^{R_1} E(\gamma') J_1(\chi' r) \gamma' d\gamma' d\chi, \quad (1)$$

но развитое в [5, 6] квазистационарное приближение решения задачи приводит к более простому алгоритму численных исследований, базирующихся на выражении для вносимой комплексной емкости:

$$C_{\text{вн}} = \frac{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_1 R_2}{\lg(R_2/R_1)} \int_0^{\infty} \frac{J_0(\chi R_1) - J_0(\chi R_2)}{\chi} J_1(\chi R_1) A_1(\chi, \tilde{\varepsilon}) d\chi. \quad (2)$$

Однако здесь не учитываются процессы экранирования свободных носителей заряда.

В представленных выражениях:  $J_0, J_1$  – функции Бесселя соответствующего порядка;  $A_1(\chi, \tilde{\varepsilon}_1, \omega)$  и  $A_1(\chi, \tilde{\varepsilon})$  – функции, зависящие от параметров слоистого образца и определяемые из рекуррентных соотношений, приведенных в работах [6, 8];  $\omega$  – рабочая частота;  $\varepsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\tilde{\varepsilon}_1$  – комплексная относительная диэлектрическая проницаемость  $i$ -го слоя структуры образца.

Для образцов, у которых тангенс угла потерь ( $\text{tg}\delta$ ) в слоях не превышает 0,1, квазистационарное приближение дает результат, хорошо совпадающий с вычислениями по более строгому алгоритму. При более высоком значении  $\text{tg}\delta$  можно использовать приближение, основанное на представлении поля (1). Алгоритм вычисления изменения добротности и резонансной частоты ИП будет описан нами в последующей работе. Его применение обеспечивает существенно меньшую по сравнению со строгим решением задачи трудоемкость численных исследований.

При изучении структурообразований в аморфных слоях для определения их удельного содержания и кинетики изменений, как и в предыдущих работах [3, 4], будем пользоваться Максвелл-Вагнеровским механизмом поляризации при расчете эффективной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь.

На рис. 2 представлены зависимости выходных сигналов рассматриваемого ИП от концентрации сферических включений гексагонального селена ( $\text{tg}\delta_r = 0,5$ ;  $\varepsilon_r = 8,5$ ) в аморфных слоях ( $\text{tg}\delta_a = 4 \cdot 10^{-3}$ ;

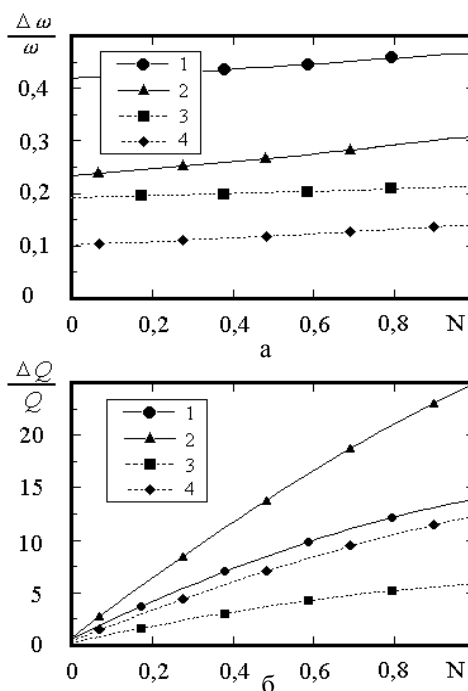


Рис. 2. Зависимости выходных сигналов ИП от концентрации сферических включений

$e_a = 6,24$ ) различной толщины. Кривые 1, 3 на рис. 2 соответствуют толщине образца 100 мкм, 2, 4 – 400 мкм; кривые 1, 2 отвечают размеру зазора 10 мкм, 3, 4, – 50 мкм.

Заслуживают внимания следующие их особенности по сравнению с ИП на основе цилиндрического резонатора с  $H_{012}$  видом колебаний. С одной стороны, оба сигнала сильно зависят от положения образца относительно измерительного отверстия (от величины зазора), в то время как для  $H_{012}$  ИП было допустимо отклонение  $\pm 10\%$  от номинального положения вследствие слабого влияния на величину таких сигналов. С другой стороны, чувствительность рассматриваемого ИП при исследовании образцов на металлической подложке на несколько порядков выше. Это позволяет проводить их непосредственное исследование и не требует отделения от подложки, как в случае  $H_{012}$  ИП.

На рис. 3 представлены зависимости комбинированного сигнала ( $\frac{\Delta Q/Q}{\Delta\omega/\omega}$ ) от концентрации  $N$  (обозначения те же, что и на рис. 2). Из них следует, что такой сигнал инвариантен к отклонениям величины зазора от номинала в реальных

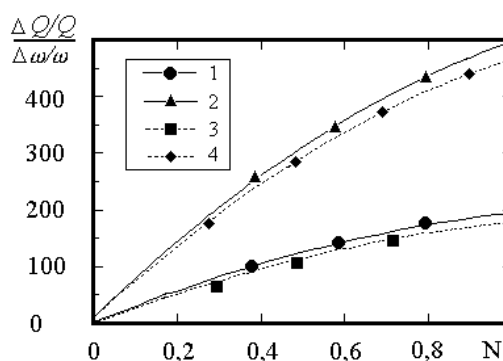


Рис. 3. Зависимости комбинированного сигнала от концентрации сферических включений

пределах толщины образца. При этом, как показали отдельные исследования, наблюдается инвариантность к выбору соотношения для описания  $\text{tg}\delta_{\text{эфф}}$  гетерогенных смесей аморфная матрица – упорядоченные включения с большой проводимостью [8].

Из экспериментальных исследований аморфных слоев селена при помощи такого СВЧ ИП установлено, что наличие упорядоченного включения гексагонального селена приводит к появлению сигнала фотопроводимости в области длины волн экспонирующих излучений  $0,6 \dots 0,75$  мкм. Это в свою очередь несет информацию о наличии и содержании гексагональной фазы. Зависимости сигнала фотопроводимости от  $N$  представлены на рис. 4 (обозначения те же, что и на рис. 2).

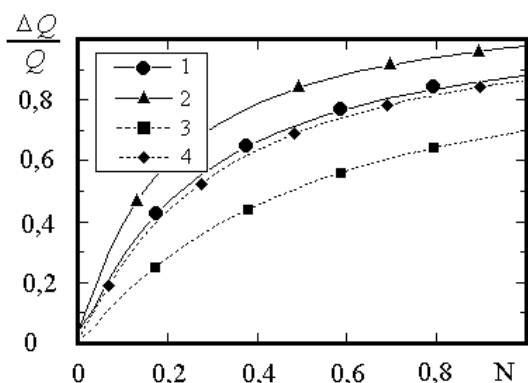


Рис. 4. Зависимости сигнала фотопроводимости от концентрации сферических включений

При нормировании фотовозбуждения с помощью отдельного исследования зависимости времени жизни носителей от  $N$  сигнал  $\Delta Q_{\phi}/Q$  позволяет одновременно с измерением  $N$  исследовать элект-

рические свойства гексагональной фазы. Сигнал  $\Delta Q_{\phi}/Q$  аппаратно реализуется в виде относительного изменения напряжения  $\Delta U_{\phi}/U_1$  на выходе СВЧ-детектора при освещении образца.

**Литература:** 1. Шнейдман И.Б. Электрофотография на селеновых слоях. – М.: Машиностроение, 1982. – 254 с. 2. Гренишин С.Г. Электрофотографический процесс. – М.: Наука. – 1970. – 375 с. 3. Гордиенко Ю.Е., Костенко В.Л. Кинетика кристаллизации аморфных конденсатов селена // Кристаллография. 1974. №2. С. 352–355. 4. Гордиенко Ю.Е., Костенко В.Л., Мельникова Л.П. Фотокристаллизация аморфных конденсатов селена // Кристаллография. – 1975. – №5. – С. 1003–1005. 5. Ахманаев В.Б., Детинко М.В., Медведев Ю.В. Неразрушающие бесконтактные СВЧ резонаторные методы локального контроля электрофизических параметров полупроводниковых материалов // Дефектоскопия. – 1986. – №1. – С. 23–33. 6. Данилов Г.И., Детинко М.В., Медведев Ю.В. Резонаторный метод измерения удельного сопротивления и толщины эпитаксиальных пленок // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1982. – Вып. 6. – С. 16–19. 7. Гордиенко Ю.Е. Резонансные измерительные преобразователи в диагностике микрослоистых структур // Радиотехника. – 1996. – Вып. 100. – С. 253–267. 8. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение. – 1986. – С. 173–175.

Поступила в редколлегию 22.12.97

**Гордиенко Юрий Емельянович**, д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХТУРЭ. Научные интересы: микроэлектроника, неразрушающий контроль материалов и изделий. Адрес: 310726, Украина, Харьков, пр. Ленина, 14, тел.: (0572) 409-362, 321-276.

**Фар Раафат Саид**, аспирант кафедры МЭПУ ХТУРЭ. Научные интересы: неразрушающий контроль материалов и изделий. Адрес: 310726, Украина, Харьков, пр. Ленина, 14, тел.: (0572) 409-362.