



2. Измерение  $\epsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$  высокоомных полупроводниковых материалов с верхним пределом  $\rho = 10^5 \text{ ом} \cdot \text{см}$ .

3. Исследование фотоэлектрических процессов в полупроводниковых материалах с минимально обнаруживаемым  $\Delta\sigma_{\Phi} = 10^{-8} / \text{ом} \cdot \text{см} / \text{л}^{-1}$ .

4. Изучение кинетики фазовых превращений в стеклообразных полупроводниках (при исследовании расстеклования аморфного селена в гексагональную модификацию чувствительность достигает 0,1% кристаллических включений).

5. Изучение изотермических процессов релаксации проводимости структурно неоднородных полупроводников.

6. Измерение толщины эпитаксиальных и диэлектрических пленок на низкоомных подложках с погрешностью меньше  $\pm 5\%$ .

7. Исследование с высокой чувствительностью изотермических изменений величины  $\epsilon$  и фотодиэлектрического эффекта.

Принцип измерения перечисленных параметров и особенности техники уже излагались ранее [1—3]. Поэтому, не останавливаясь на описании работы установки, рассмотрим некоторые аспекты нетривиальной эксплуатации АПЧ, которые еще не обсуждались в литературе.

При определении удельного сопротивления гомогенных полупроводников и эпитаксиальных пленок необходимым этапом является измерение добротности резонатора [1].

Учитывая состояние техники определения добротности объемных резонаторов, можно сделать вывод, что для достижения погрешности измерения  $\rho$  меньше  $\pm 5\%$  необходимо использовать специальные устройства прецизионного измерения  $Q$  [4, 5]. Вместе с тем такое усложнение установки было бы нежелательным. Избежать его можно, используя для измерения  $Q$  систему АПЧ, которая неизменно присутствует во всех устройствах исследования полупроводников и диэлектриков на СВЧ. В данном случае система АПЧ может применяться для плавной и контролируемой перестройки СВЧ-генератора, работающего в непрерывном режиме. Это позволит с высокой точностью определять ширину резонансной кривой измерительного резонатора на уровне половинной мощности. Высокая точность измерений при этом обеспечивается возможностью более точного установления уровня половинной мощности и применением в качестве опорного в системе АПЧ высокодобротного плавного перестраиваемого резонатора. Для этой цели можно применить цилиндрический резонатор на волне  $H_{01n}$ , перестраиваемый возмущающим диэлектриком. Практически такая перестройка может осуществляться диском слюды или кварца, положение которого устанавливается микрометрическим винтом. Градуировочная кривая перестройки такого резонатора на данной рабочей частоте строится по формуле

$$\Delta f = f_0 \frac{\epsilon - 1}{2} \left\{ \frac{d}{l} - \frac{1}{\pi} \left[ \cos \frac{\pi}{l} (2h + d) \sin \frac{\pi}{l} d \right] \right\}, \quad (1)$$

где  $d$  — толщина диэлектрического диска;

$l$  — высота резонатора;

$h$  — расстояние диска от торца резонатора.

При использовании этого способа перестройки резонатора точность отсчета точек половинной мощности будет определяться ошибкой автоподстройки частоты СВЧ-генератора по опорному резонатору. Максимально измеряемая добротность резонатора в этом случае ограничивается достижимой при помощи АПЧ стабильностью СВЧ-генератора.

Статическую ошибку системы АПЧ можно определить из выражения (2), при выводе которого предполагается, что перестройка генератора с помощью системы АПЧ производится возмущением по типу скачка:

$$\Delta f_{ст} = \frac{\Delta f_0}{1 + K}, \quad (2)$$

где  $\Delta f_0$  — разность частот генератора и опорного резонатора;

$K$  — коэффициент передачи разомкнутой системы, который определяется произведением коэффициентов передачи входящих в нее элементов.

Из (2) следует, что для уменьшения погрешности измерения  $Q$  указанным способом необходимо уменьшать статическую ошибку системы АПЧ путем применения высокодобротного опорного резонатора и усилителя с высоким коэффициентом усиления.

Практически на частоте  $10^{10}$  гц нетрудно реализовать систему АПЧ со статической ошибкой  $10^4$  гц. При этом принципиально достижима погрешность измерения добротности составит  $\pm 2\%$  и не будет практически зависеть от величины измеряемой добротности вплоть до  $Q = 2 \cdot 10^4$ . Последнее утверждение следует из выражения

$$\frac{\delta Q}{Q} = \sqrt{\left(\frac{\delta f_0}{f_0}\right)^2 + \left(\frac{1}{1 + K}\right)^2}. \quad (3)$$

Система АПЧ может быть также использована при исследовании фотодиэлектрического эффекта в полупроводниках. Величина изменения диэлектрической проницаемости зачастую не столь велика, чтобы исследовать эффект обычными методами.

Чувствительность этих измерений можно значительно повысить, применяя систему АПЧ по измерительному резонатору (переключатель  $I$  в положении  $II$ ) и регистрируя сигнал с дискриминатора, крутизна которого может изменяться электрически (при помощи диода) или механически (введением поглотителя). Величина сигнала при этом будет определяться выражением

$$dU_D = \frac{\Delta f}{3Q_0} a_2 P_0 a_0 f_0 \left[ \frac{8}{(2 + a_0)^2} + \frac{1}{(1 + a_0)^2} \right],$$

где  $a_0 = 2Q \frac{\Delta f}{f_0}$  — обобщенная амплитуда девиации частоты;  
 $\Delta f$  — амплитуда девиации частоты генератора;  
 $Q_0$  — ненагруженная добротность резонатора;  
 $a_2$  — коэффициент, зависящий от чувствительности детектора и его нагрузки;  
 $P_0$  — мощность, подводимая к детектору при резонансе.

Расчет показывает, что чувствительность регистрации фотоэлектрического эффекта в этом случае может быть повышена на два порядка и ограничивается стабильностью СВЧ-генератора.

Таким образом, благодаря более широкому использованию возможностей системы АПЧ удастся максимально упростить измерительную установку для исследования полупроводников на СВЧ, одновременно расширив ее функциональные возможности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Методы определения параметров полупроводников и полупроводниковых пленок на СВЧ. Сборник статей под редакцией Я. А. Федотова. Вып. 23, М., «Советское радио», 1970.
2. Трухан Э. М. Установка для измерения малых потерь и эффекта Холла на СВЧ. — ПТЭ, 1965, № 4, с. 198—200.
3. Гордиенко Ю. Е. Автореф. канд. дис., Харьков, 1968. 13 с.
4. Измерения в электронике. Справочник. Т. I. М.—Л., «Энергия», 1965, с. 210—224.
5. Пути повышения точности измерения характеристик диэлектриков на СВЧ. — «Измерительная техника», 1969, № 5, с. 62—64. Авт.: Т. Д. Бурдун, Е. Б. Зальцман, В. Е. Пояркова и др.