

МЕТОД КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДИФфуЗИОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

Одним из важных параметров диффузионных слоев, подлежащих контролю, является поверхностное сопротивление, которое характеризует сопротивление квадрата поверхности слоя.

Как известно, для измерения поверхностного сопротивления используют в основном четырехзондовый метод [1]. Однако этот метод является разрушающим, что и предопределило, в первую очередь, интерес к исследованию диффузионных структур при помощи СВЧ методов. В работе [1] обсуждалась возможность определения поверхностного сопротивления диффузионных структур с помощью импедансной методики, основанной на анализе измерений составляющих комплексного импеданса участка поверхности диффузионной структуры от параметров образца. Экспериментально поверхностное сопротивление определяют по узловым значениям входного импеданса, измеренного со стороны диффузионного и базового слоев с помощью градуировочных зависимостей. Однако наличие погрешностей, присущих этому методу, обусловленных влиянием электрического контакта образца со стенками волновода, а также значительное влияние на результат измерения модового состава падающей на образец волны, заставляют искать более эффективные методы определения поверхностного сопротивления диффузионных структур.

Проанализируем возможность определения поверхностного сопротивления при помощи СВЧ-резонаторного метода, который избавлен от перечисленных выше недостатков. Вначале выясним зависимость основных информационно-измерительных характеристик СВЧ-резонатора (какими является, в первую очередь, добротность резонатора) от поверхностного импеданса.

Если экранированная диффузионная структура заменяет часть стенки резонатора, то в общем случае выражение для его добротности Q_2 примет вид

$$Q_2 = \frac{\omega_2 W_3}{Z'_2 \oint H_2^2 dS} = \frac{\omega_2 W_3}{\oint \sigma(Z) E^2 dV} = \frac{\omega'}{\omega''}, \quad (1)$$

где ω_2 , ω' , ω'' – резонансная частота; W_3 – энергия электромагнитного поля, запасенная в резонаторе; Z_2 – импеданс; E_2 , H_2 – электрическая и магнитная составляющие электромагнитного поля; $\sigma(Z)$ – удельная электропроводность среды.

Для однородного образца справедливо выражение

$$Q_{\text{одн}} = \frac{\omega_0 W_{30}}{Z'_{\text{исх}} \oint H_{\text{одн}}^2 dS}, \quad (2)$$

где индекс «исх» относится к однородному образцу до легирования. Предполагая, что диффузионный слой незначительно влияет на перераспределение поля в резонаторе, так как находится в области слабого поля, можно считать, что

$$\frac{\omega_2 W_3}{\oint H_2^2 dS} = \frac{\omega_0 W_{30}}{\oint H_{\text{одн}}^2 dS}, \quad (3)$$

Тогда выражение для определения импеданса будет записано в виде

$$Z'_2 = \frac{Z'_{\text{исх}}}{1 - \frac{Q_{\text{исх}} - Q}{Q_{\text{исх}}}}, \quad (4)$$

где $Z'_{\text{исх}} = \frac{1}{\sigma_{\text{исх}} \cdot h_2}$; h_2 – толщина диффузионного слоя; W_3 – энергия электромагнитного поля, запасенная в резонаторе; Z_2 – импеданс; $\sigma(z)$ – удельная электропроводность среды.

Рассмотрим зависимости изменения добротности резонатора Q , содержащего диффузионную структуру, по сравнению с однородной структурой от степени включения образца в поле резонатора и параметров закона распределения примеси.

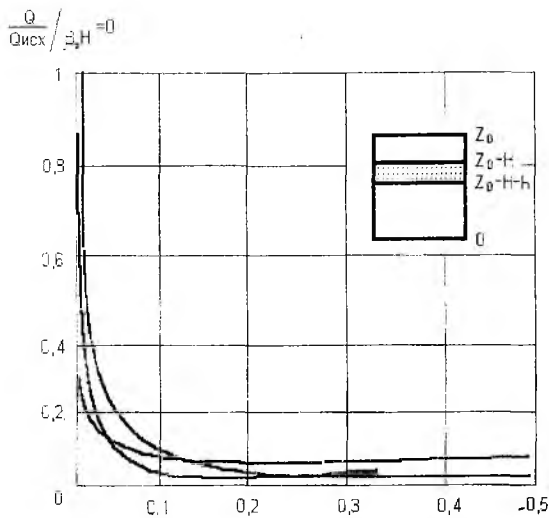


Рис. 1

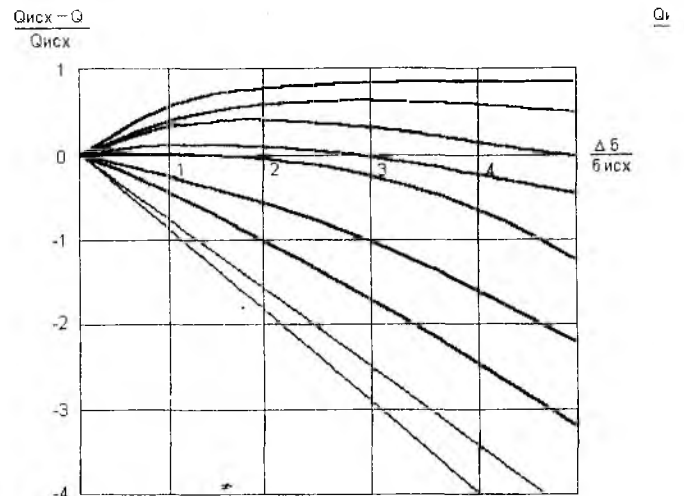


Рис. 2

На рис. 1 представлены зависимости отношения добротностей $\Delta Q/Q_{исх}$ от уровня включения кремниевого образца в поле измерительного преобразователя (ИП) и параметров неоднородно легированного слоя, рассчитанные с помощью одномодового приближения [2]. Закон распределения электропроводности по глубине структуры в этом случае выбран экспоненциальным:

$$\sigma(Z) = \sigma_{исх} \left[1 + \frac{\Delta\sigma}{\sigma_{исх}} e^{-\alpha Z} \right],$$

где $\sigma_{исх}$ — электропроводность пластины до диффузии примеси. Как видно из графика, величина добротности зависит как от уровня включения образца в поле ИП, так и от параметров неоднородно легированной структуры. Наиболее наглядно это иллюстрируется при помощи зависимостей, приведенных на рис. 2, которые характеризуют изменение добротности резонатора в случае замены исходного образца образцом с диффузионным слоем (величины параметра $\beta_1 H$ принимают значения соответственно 0; 0,04; 0,05; 0,06; 0,07; 0,08; 0,09; 0,1; 0,12).

Анализ представленных зависимостей показывает, что уровню включения добротность ИП с диффузионной структурой может быть меньшей, большей или равной добротности резонатора, нагруженного однородным образцом. Уровень включения, при котором эта разница значений добротности будет максимальной, определяется исходной пластиной и, как следует из графика, равняется $\beta_1 H = 0,12$ независимо от параметров диффузионного слоя. В то же время абсолютное значение такой разницы определяется характеристическими параметрами неоднородно легированного слоя. Анализ представленных на рис. 2 зависимостей позволяет предложить методику контроля поверхностного сопротивления диффузионных структур.

На рис. 3 показаны зависимости для определения поверхностного сопротивления Z'_2 , в основу которых положено измерение разности между добротностями ИП с образцом до легирования и с диффузионным слоем. Сопротивление квадрата поверхности R_s можно определить по значениям добротности, измеренной со стороны диффузионного и базового слоев с помощью предварительно построенных градуировочных кривых.

Методика измерения в этом случае представлена следующей. С помощью однородной пластины с известным значением электропроводности производим предварительную градуировку ИП, которая заключается в измерении зависимости добротности $Q_{исх}$ от степени включения образца в поле резонатора. Аналогичным образом исследуем добротность резонатора с диффузионным слоем. С помощью результатов исследований определяется уровень включения, когда разность добротности ИП с однородным и неоднородным образцом имеет максимальное значение. Затем при помощи градуировоч-

ных кривых, подобных представленным на рис. 3, устанавливаем поверхностное сопротивление диффузионной структуры (кривые семейства 1 соответствуют $\sigma_{исх} = 10(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$, а кривые семейства 2 — $\sigma_{исх} = 20(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$; $\beta_1 H = 0.12$ соответственно)

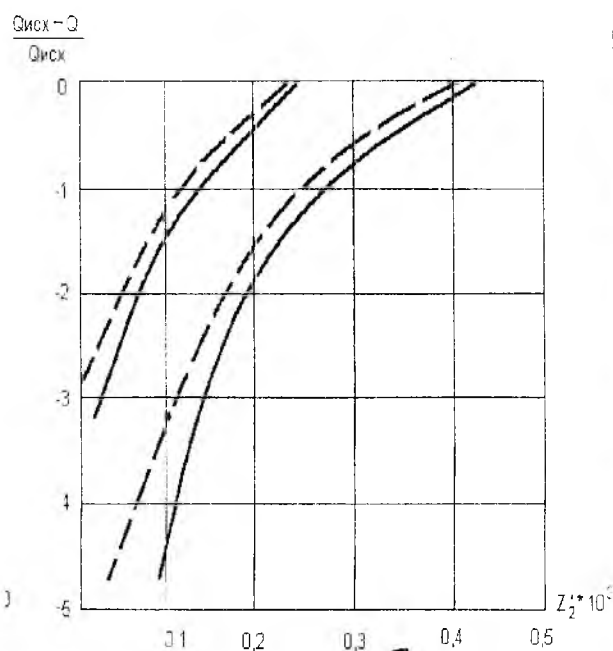


Рис.3

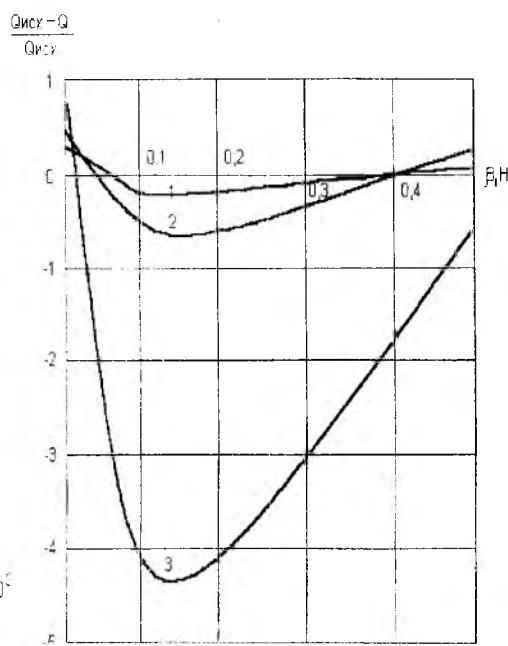


Рис.4

Исследуем возможность организации двухпараметрового метода контроля диффузионных структур. Величинами, подлежащими контролю в этом случае, являются параметры закона распределения электропроводности при известных значениях $\sigma_{исх}$. Численные расчеты с помощью одномодового приближения позволяют поставить в соответствие независимые информационные характеристики ИП с параметрами закона распределения электропроводности $\Delta\sigma$ и при определенных уровнях включения образца в поле резонатора $\beta_1 H$. Такими характеристиками ИП может быть значение добротности, измеренной со стороны диффузионного и базового слоев.

Из анализа зависимостей, представленных на рис. 4, следует, что для конкретного значения $\sigma_{исх}$ существует уровень включения, при котором добротности резонатора, нагруженного образцом с диффузионным слоем и однородным образцом, равны. Это даст возможность сформулировать двухпараметровый метод контроля диффузионных слоев. Сущность метода заключается в том, что наличие двух независимых сигналов измерительной информации (например, уровень включения, когда добротности резонатора с однородным образцом равны, и уровень включения, при котором эта разница максимальна) позволяет определить параметры закона распределения $\Delta\sigma$ и α при известных значениях $\sigma_{исх}$.

Методика двухпараметрового контроля состоит в следующем. С помощью однородной пластины проводим предварительную градуировку резонатора, которая заключается в измерении зависимости его добротности Q от степени включения образца в поле резонатора. Затем таким же образом исследуем добротность ИП, нагруженного диффузионной структурой. Далее определяем уровень включения, когда добротности резонатора с однородным образцом и диффузионной структурой равны, и определяем уровень включения, при котором эта разница максимальна. При помощи соответствующих градуировочных кривых аналогичных приведенным на рис. 5 определяем характеристические параметры закона распределения электропроводности. При этом приходится дважды измерять добротность резонатора, что существенно снижает точность контроля. При точности измерения $\Delta Q/Q$ порядка $5 \cdot 10^{-2}$ погрешность определения параметров диффузионного слоя может достигать 7% для слоев с $\alpha = 5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ и 30% в случае больших α . Поэтому для повышения точности двухпараметрового контроля целесообразно вместо величины $(Q_{исх} - Q)/Q_{исх}$ определять другую количественную характеристику результата воздействия образца, устанавливаемую, например, такой же измерительной процедурой, как $(\beta_1 H)$.

Процедура контроля диффузионных структур в этом случае заключается в плавной перестройке степени включения образца в поле ИП и регистрации уровней включения – $(\beta_1 N)_0$, при котором выходной сигнал мощности или напряжения с ИП оказывается равным сигналу на выходе ИП, когда он нагружен исходной пластиной, и $(\beta_1 N)_1$, при котором переменный гармонический сигнал фотопроводимости образца обращается в нуль, изменяя знак. Тогда параметры диффузионной структуры устанавливаем с помощью измеренных значений $(\beta_1 N)_0$ и $(\beta_1 N)_1$ по градуировочным характеристикам, подобным представленным на рис. 6.

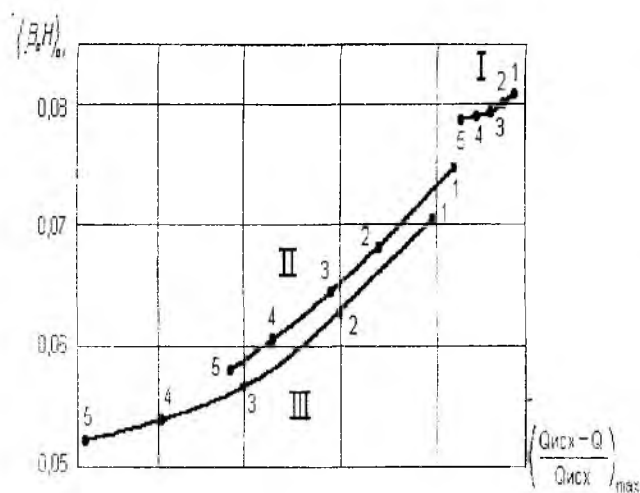


Рис.5

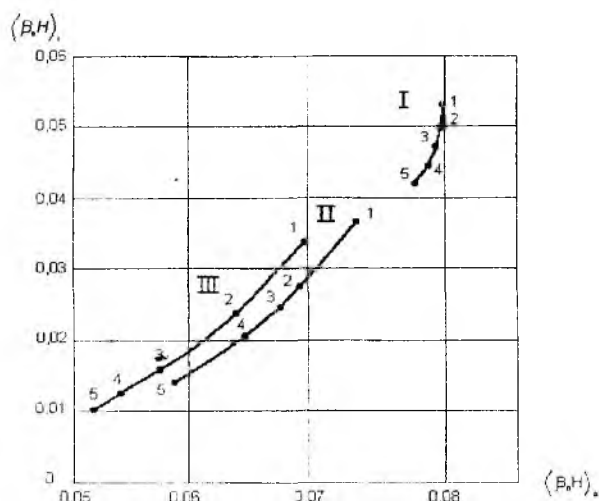


Рис.6

Значения изменения добротности и сигнала фотопроводимости для различной степени включения образца в поле резонатора $\beta_1 N$ хорошо различаются при разных αh_2 и $\Delta\sigma/\sigma_{исх}$, что обеспечивает экспериментальную основу установления закона распределения. Априорная оценка погрешности определения параметров закона легирования для кремневых структур с $\sigma_{исх} = 10 - 100 \text{ (Ом)}^{-1}$, $h_{исх} = (1-4) \cdot 10^{-4} \text{ м}$, $\Delta\sigma/\sigma_{исх} = 1-5$ и $\alpha = 5 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}$ проводилась на основании результатов расчета Q и $\Delta Q_\psi/Q$, представленных на рис. 4. Результаты оценки погрешности при помощи измерения максимальной разности добротности приведены на рис. 7.

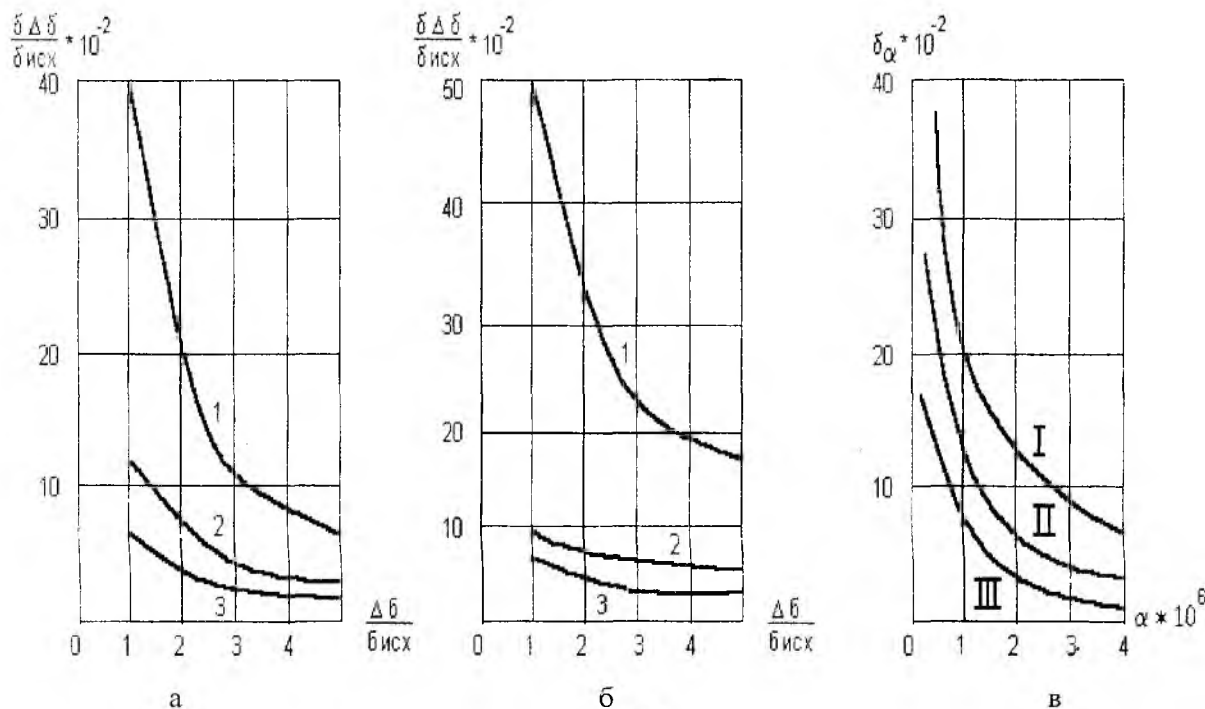


Рис. 7

Анализ результатов показывает, что погрешность возрастает со снижением уровня легирования и уменьшением глубины залегания неоднородно легированного слоя.

Развитые выше основные положения по методике двухпараметрового контроля диффузионного контроля показывают, что двухпараметровую диагностику возможно осуществить путем применения различных ИП, различного включения образца в поле ИП и совмещения фотомодуляционной методики с обычной.

Список литературы: 1. Григулис Ю.К., Пориньш В.М. Исследование диффузионных слоев полупроводников электромагнитным импедансным методом // Полупроводники и их применение в электротехнике. Рига, 1971. Вып. 5. С. 109-121. 2. Гордиенко Ю.Е. Определение характеристик объемных резонаторов со слоистым заполнением / Радиотехника: Всеукр. межведомств. сб. 1982. Вып. 60. С. 17-23.

*Харьковский государственный технический
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 9.03.2000