

Ю.Е. ГОРДИЕНКО, д-р физ.-мат. наук,
Ю.И. ГУД, канд. техн. наук, И.В. СУХОРУКОВ

РАЗВИТИЕ ТЕХНИКИ БЕЗЭЛЕКТРОДНОГО СВЧ-КОНТРОЛЯ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Диагностика полупроводников прошла значительный путь развития — от использования простейших зондовых методов до внедрения комплексных методов многопараметрового контроля [1]. Значительная их часть связана с контролем удельного сопротивления полупроводников. К перспективным методам контроля данного параметра следует отнести СВЧ-резонаторные методы [2; 6], которые характеризуются высокой чувствительностью, локальностью, возможностью осуществления неразрушающего, безэлектродного контроля.

Для СВЧ-резонаторных измерительных преобразователей (ИП) основными информативными сигналами чаще всего являются изменения добротности и резонансной частоты резонатора, вызванные воздействием исследуемого образца на электромагнитное поле ИП.

Объектами контроля при диагностике полупроводниковых материалов в большинстве случаев служат пластины и эпитаксиальные структуры (таблица).

Структура	Толщина, мкм	Удельное сопротивление, Ом·см	Область применения
Пластины р-, n-, n ⁺ -типа	250...400	0,01...250	Биполярные ИС, n-МОП, КМОП ИС, дискретные диоды, тиристоры
Пластины полупроводящего GaAs	250...400	10 ⁷ ...10 ⁸	МЭП-транзисторы ИС, оптоэлектронные приборы
Пластины компенсированного Si	250...400	10 ⁴ ...10 ⁵	Оптоэлектронные приборы
Двухслойные (подложка/пленка) структуры n ⁺ -n, p ⁺ -n, p-p	$\frac{250}{1...70}$	$\frac{0,001...10}{0,3...10}$	Дискретные транзисторы, диоды, биполярные ИС, оптоэлектронные приборы

Из приведенных данных видно, что диапазон удельного сопротивления пластин и подложек весьма широк — от 10^{-3} до 10^8 Ом·см при толщинах 250 ... 400 мкм. Для эпитаксиальных пленок удельное сопротивление варьируется в диапазоне 0,1 ... 10 Ом·см, а их толщина — 0,5...100 мкм.

На основе анализа характеристик преобразования различных СВЧ ИП [4; 5] можно утверждать, что добиться полной их универсальности, позволяющей реализовать контроль удельного сопротивления в столь широком диапазоне его значений и типов используемых материалов (пластины, эпитаксиальные структуры), не представляется возможным.

Одним из наиболее существенных моментов при организации контроля с помощью СВЧ-резонаторных ИП накладного типа является наличие ряда мешающих факторов, которые сильно влияют на точность измерений удельного сопротивления полупроводников. К ним, в первую очередь, следует отнести наличие неконтролируемого зазора между образцом и ИП и отклонение размеров образцов от требуемых значений.

В большинстве предшествующих разработок погрешности, связанные с техническими условиями контроля, оговаривались, и при проведении измерительных операций принимались специальные меры, направленные на исключение или снижение влияния мешающих факторов. Однако это заметно ограничивало практическую реализацию высоких потенциальных возможностей СВЧ-методов контроля.

Анализ характеристик преобразования СВЧ ИП показывает, что значительного снижения влияния мешающих факторов можно добиться путем формирования сигнала измерительной информации, инвариантного к их влиянию, на основе комбинации основных информативных сигналов резонаторного ИП [3]. Для этих целей можно воспользоваться, например, такими фундаментальными выходными сигналами, как относительные изменения резонансной частоты $\Delta\omega/\omega$ и добротности $\Delta Q/Q$ резонаторного ИП, вызванные воздействием образца.

Высоких значений локальности контроля и коэффициента включения образца в поле резонаторного ИП, определяющего чувствительность измерений удельного сопротивления, можно достичь, используя ИП на основе коаксиального резонатора с укорачивающей емкостью (ИП емкостного типа) [6]. Внешнее включение образца в краевое электрическое поле измерительного отверстия такого ИП позволяет организовать неразрушающие измерения при одностороннем доступе к образцу. Однако основным недостатком ИП емкостного типа, сдерживающим их широкое применение, является существенное влияние упомянутых выше мешающих факторов на результаты измерений.

Численные исследования характеристик преобразования СВЧ ИП емкостного типа, позволившие выполнить качественный анализ

разработанных методик уменьшения влияния зазора и разброса толщин образцов на результаты измерения удельного сопротивления полупроводниковых пластин, проводились на основе квазистационарного приближения. Последнее базируется на выражении, которое описывает емкость, вносимую образцом в ИП при заданной конфигурации емкостного штыря и апертуры щелевого измерительного отверстия. В частности, для коаксиального ИП с укорачивающей емкостью ее представление через параметры контролируемого образца имеет вид [6]

$$\tilde{C} = C' + jC'' = \frac{2\pi\epsilon_0 R_2}{\ln(R_2/R_1)} \int_0^\infty \frac{J_0(\chi R_1) - J_0(\chi R_2)}{\chi} J_1(\chi R_1) A_N(\chi) d\chi. \quad (1)$$

Здесь ϵ_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума; R_2 — радиус апертуры измерительного отверстия ИП; R_1 — радиус емкостного штыря в апертуре измерительного отверстия; $J_{0,1}$ — функции Бесселя соответствующих порядков; χ — корни характеристических уравнений; $A_N(\chi)$ — коэффициент, определяемый рекуррентными соотношениями.

При этом добротность и резонансная частота такого ИП следующим образом связаны с данной составляющей емкости:

$$\omega = [L_0(C_0 + C')]^{-1/2};$$

$$Q^{-1} = (Q_0 \frac{C_0}{C'} + \frac{C''}{C'}) \frac{C'}{C_0 + C'}, \quad (2)$$

где C_0, L_0 — емкость внутренней области резонансного ИП и его эквивалентная индуктивность; Q_0, Q — добротность ИП без образца и с образцом.

На основании результатов теоретических исследований резонаторного ИП емкостного типа (рис. 1) можно утверждать, что изменения его добротности $\Delta Q/Q$ и резонансной частоты $\Delta\omega/\omega$, вызванные образцом, в одних условиях выражаются качественно одинаковыми зависимостями от влияния мешающих факторов, а в других — зависимости взаимно обратны. Кривые 1—3 на рис. 1 соответствуют толщине образца 300 мкм, 4 — 200, 5 — 400; кривая 1 отвечает размеру зазора 10 мкм, 2, 4, 5 — 30, 3 — 50. Эта особенность позволяет организовать процедурно несложные измерения удельного сопротивления полупроводниковых пластин и эпитаксиальных пленок в двухслойных структурах с исключением или значительным снижением влияния мешающих факторов. Например, при малом возмущении поля резонаторного ИП образцом, что выполняется в большинстве практически встречающихся случаев, справедливы следующие соотношения:

$$\frac{\Delta Q}{Q} = Q_0 \varepsilon_2 \eta \operatorname{tg} \delta_2 ; \quad \frac{\Delta \omega}{\omega} = (\varepsilon_2 - 1) \eta , \quad (3)$$

где ε_2 – относительная диэлектрическая проницаемость образца; η – коэффициент включения образца в поле резонаторного ИП; $\operatorname{tg} \delta_2$ – тангенс угла потерь образца [5].

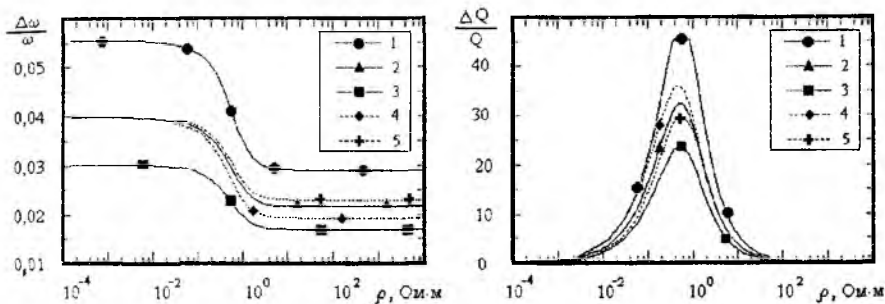


Рис. 1

Надо учесть, что влияние зазора входит в параметр η наряду с геометрией (толщиной) образца и ИП; поэтому в пределах выполнимости требования малого возмущения отношение сигналов $\Delta \omega / \omega$ и $\Delta Q / Q$ не зависит от указанных параметров. Следовательно, сформировав такой комбинированный информативный сигнал, можно выполнить высокоточное и вместе с тем сравнительно несложное измерение удельного сопротивления ρ или $\operatorname{tg} \delta$ полупроводников.

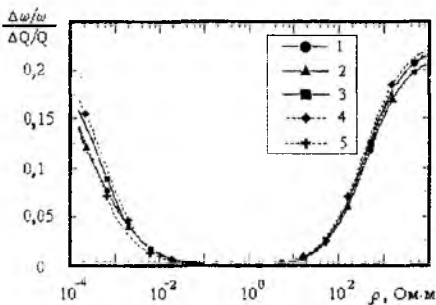


Рис. 2

В подтверждение сказанного на рис. 2 даны характеристики преобразования резонаторного ИП емкостного типа для комбинированного информативного сигнала в виде отношения $X = (\Delta \omega / \omega) / (\Delta Q / Q)$, рассчитанные в соответствии с уравнениями (1), (2) для кремниевых пластин и рабочей частоты ИП 1,6 ГГц. Обозначения те же, что и на рис. 1.

Сравнение полученных характеристик с зависимостями на рис. 1 показывает, что такой ИП эффективно использовать при измерении высокоомных полупроводниковых пластин. При этом влияние толщины пластин на результаты измерения ρ (или $\text{tg}\delta$) практически отсутствует, а влияние зазора в значительной мере снижено. Подбирая соответствующую рабочую частоту резонаторного ИП, можно в достаточно широких пределах варьировать диапазон контролируемых значений удельного сопротивления полупроводников (от 1 до 10^6 Ом·см).

Используя выражение (3), нетрудно показать, что в случае применения линейного СВЧ-детектора на выходе резонаторного ИП удельное сопротивление исследуемого полупроводникового образца находится в явном виде:

$$\rho = K \frac{\Delta f / f_0}{(U_0 - U_1) / U_1} = K \frac{\Delta f / f_0}{\Delta U / U_1}; \quad (4)$$

$$K = [2\pi f_0 \varepsilon_2 \varepsilon_0 (1 + 2\xi_0)]^{-1},$$

где K — постоянный коэффициент, определяемый добротностью Q_0 резонаторного ИП без образца и его резонансной частотой f_0 , коэффициентами связи ξ_0 резонатора с СВЧ-трактом и диэлектрическими свойствами образца ε_2 ; U_0, U_1 — напряжения, снимаемые с СВЧ-детектора на выходе ИП, настроенного в резонанс, без образца и с образцом соответственно.

Для подтверждения теоретических положений были проведены экспериментальные исследования на кремниевых высокоомных пластинах. Варьирование размера зазора осуществлялось путем контролируемого перемещения образца относительно плоскости измерительного торца ИП, а толщина образца менялась стравливанием поверхности пластины. Исследования показали, что отклонение размера зазора или толщины образца от заданных значений на 50 % приводит к изменению выходных сигналов $\Delta\omega/\omega$ и $\Delta Q/Q$ ИП на 20 % и более, в то время как изменение комбинированного сигнала не превышает 4 %.

Описанные принципы формирования сигнала измерительной информации были положены в основу прибора для измерения удельного сопротивления полупроводниковых пластин и слитков. Структурная схема прибора дана на рис. 3. Основными функциональными узлами прибора являются: СВЧ-резонаторный измерительный преобразователь ИП; пере-страиваемый по частоте СВЧ-генератор Г; СВЧ-детектор Д; предварительный усилитель ПУ; аналого-цифровой преобразователь АЦП; устройство анализа производной УАП; цифро-аналоговый преобразователь ЦАП; блок управления и синхронизации БУС; вычислительный блок ВБ; блок индикации БИ; блок питания (не показан).

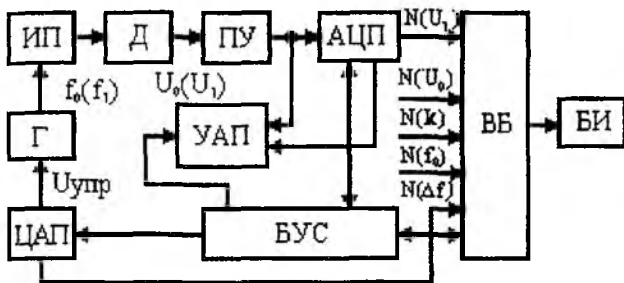


Рис. 3

Цикл работы прибора состоит из трех этапов: 1) автоматизированной подстройки частоты колебаний СВЧ-генератора на резонансную частоту f_1 ИП, нагруженного полупроводниковым образцом; 2) измерения параметров $\Delta f = f_0 + f_1$, U_1 и их преобразования в двоичные коды $N(\Delta f)$, $N(U_1)$; 3) вычисления значения удельного сопротивления образца ρ в соответствии с выражением (4) и индикации результата.

Измерение параметров f_0 , U_0 производится в ручном режиме настройки частоты колебаний СВЧ-генератора один раз при калибровке прибора. Полученные значения f_0 , U_0 пересчитываются с учетом коэффициента усиления предварительного усилителя и коэффициента преобразования АЦП в двоичные коды $N(f_0)$ и $N(U_0)$ и задаются в качестве постоянных величин в вычислительном блоке.

Разработанный прибор обеспечивает измерение удельного сопротивления полупроводниковых пластин в диапазоне $1 \dots 10^5$ Ом·см с погрешностью, не превышающей $\pm 7\%$, при локальности контроля 1,5 мм.

Список литературы: 1. Батавин В.В., Концевой Ю.А., Федорович Ю.В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь, 1985. 264 с. 2. Гордиенко Ю.Е. Неразрушающий контроль электропроводности и толщины эпитаксиальных пленок на высокоомных подложках // Электрон. техника. Сер. 8. 1974. Вып. 7(25). С. 91–97. 3. Гуд Ю.И., Панченко А.Ю., Сухоруков И.В. СВЧ-методы контроля физических параметров материалов и объектов // 2-я Междунар. конф. «Теория и техника передачи, приема и обработки информации», Харьков, Туапсе, 1996 г.: Тез. докл. X., 1996. С. 161. 4. Гордиенко Ю.Е., Гуд Ю.И. Синтез оптимальных СВЧ-резонаторных измерительных преобразователей для контроля параметров пленок на низкоомных подложках // Радиотехника. 1987. Вып. 80. С. 105–112. 5. Гордиенко Ю.Е. Резонаторные измерительные преобразователи в диагностике микросложных структур // Там же. 1996. Вып. 100. С. 253–260. 6. СВЧ-резонаторный метод измерения удельного сопротивления и толщины эпитаксиальных пленок / Г.Н. Данилов, М.В. Детинко, Ю.В. Медведев, А.Д. Свирякина // Электрон. техника. Сер. Электрон. СВЧ. 1982. Вып. 6(342). С. 16–19.

Харьковский государственный технический университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 05.12.97