

УДК 621.317.799.2

Ю. Е. ГОРДИЕНКО, Ю. И. ГУД

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНОК НА СИЛЬНОЛЕГИРОВАННЫХ ПОДЛОЖКАХ

В связи с интенсивным развитием техники полупроводниковых пленок стала актуальной разработка методов определения параметров пленочных структур. Для контроля параметров различных слоистых структур широко применяются оптические, зондовые и химические методы измерения [1]. Однако они не всегда удовлетворяют растущим требованиям промышленности, в особенности, если измерения требуется выполнять оперативно, без повреждений, не создавая специальных электрических контактов. В связи с этими требованиями обращают на себя внимание СВЧ-методы измерения параметров полупроводников, позволяющие производить бесконтактные неразрушающие измерения параметров пленок.

В данной работе рассматривается возможность неразрушающего измерения удельного сопротивления тонких эпитаксиальных пленок на сильнолегированных подложках с помощью СВЧ-измерительного цилиндрического резонатора, работающего на волне H_{01n} . Достоинством резонаторного датчика на этой волне является простота его изготовления и абсолютная бесконтактность измерения при замене одного из торцов резонатора исследуемым образцом.

Обычный резонатор на волне H_{01n} характеризуется низкой чувствительностью при измерении толщины и удельного сопротивления полупроводниковых эпитаксиальных пленок на сильнолегированных подложках. В работе [2] показано, что чувствительность измерения толщины пленок менее 40 мкм можно увеличить, используя в резонаторном датчике четвертьволновый диэлектрический вкладыш, одна из граней которого прилегает к заменяемому исследуемым образцом торцу резонаторного датчика, а другая находится в пучности электрического поля стоячей волны. Измерение толщины пленки при этом по сути сводится к измерению разности реактивной части импеданса Z'' двухслой-

ной структуры (высокоомная пленка — низкоомная подложка) и подложки. Рабочая частота выбирается так, чтобы толщина подложки исследуемого образца была значительно больше глубины скин-слоя.

Из выражения для реактивной части импеданса, приведенного в работе [3] в случае двухслойной среды, нетрудно получить упрощенную формулу, определяющую зависимость реактивной части импеданса от параметров двухслойной структуры в случае тонких полупроводниковых пленок, когда выполняются условия $2\alpha h < 0,4$; $2\beta h < 0,3$;

$$Z'' = \frac{\frac{h}{\rho_{\text{под}}} \sqrt{\mu\omega\rho_{\text{под}}} + \frac{1}{\sqrt{2}}}{\frac{1}{\sqrt{\mu\omega\rho_{\text{под}}}} + \frac{h}{\rho_{\text{пл}}} \sqrt{2}}, \quad (1)$$

где α , β — соответственно коэффициент затухания и коэффициент распространения в материале пленки;

h — толщина пленки;

$\rho_{\text{пл}}$ — удельное сопротивление пленки;

$\rho_{\text{под}}$ — удельное сопротивление подложки.

Из (1) видно, что при определенных частотах становится существенной зависимость реактивной части импеданса не только от толщины пленки, но и от ее удельного сопротивления.

В связи с этим возникает возможность определять удельное сопротивление пленки по измерению реактивной части импеданса, которое сводится к измерению сдвига настроенного поршня резонаторного датчика, вызванного пленкой. Чувствительность такого метода измерения может быть увеличена в результате применения в резонаторном датчике четвертьволнового трансформатора.

С помощью формулы (1) получаем выражение для относительной погрешности измерения удельного сопротивления пленки в зависимости от погрешностей измерения толщины пленки и сдвига настроенного поршня:

$$\frac{\Delta\rho_{\text{пл}}}{\rho_{\text{пл}}} = \left[\frac{\left(1 - \frac{\rho_{\text{пл}}}{\rho_{\text{под}}}\right)^2 \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2}{\left(1 + \frac{h}{\rho_{\text{под}}} \sqrt{2\mu\omega\rho_{\text{под}}}\right)^2} + \left(1 + \frac{\rho_{\text{пл}}}{h\sqrt{2\mu\omega\rho_{\text{под}}}}\right)^2 \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где l — сдвиг настроенного поршня резонатора, вызванного пленкой.

На рис. 1 представлены рассчитанные кривые одинаковой погрешности, определяющие область применимости данного ме-

тогда измерения удельного сопротивления тонких эпитаксиальных пленок. Кривые рассчитаны для погрешности измерения толщины пленки 5%, которую можно реализовать при оптическом методе измерения.

Измеряя толщину пленки описанным в [2] методом, можем достичь меньшей погрешности. Так как погрешность измерения проводимости пленки в основном определяется погрешностью измерения ее толщины, в двухпараметровых измерениях при помощи резонаторного СВЧ-датчика на волне H_{01n} можно достичь более высокой точности измерения проводимости пленки.

Если в двухпараметровом методе измерения производятся на двух различных частотах, возможны следующие случаи:

- 1) совместные измерения;
- 2) независимые измерения.

Выражения для определения толщины и удельного сопротивления пленок из совместных измерений реактивной части импеданса структуры на двух частотах принимают следующий вид:

$$\rho_{пл} = \frac{Z'_2 - Z'_1 + \sqrt{\frac{2}{\mu\omega_1\omega_2\rho_{под}}} Z'_1 Z'_2 (V\sqrt{\omega_1} - V\sqrt{\omega_2})}{\frac{\omega_1 Z'_2 - \omega_2 Z'_1}{\rho_{под} V\sqrt{\omega_1\omega_2}} + \sqrt{\frac{\mu}{2\rho_{под}}} (V\sqrt{\omega_2} - V\sqrt{\omega_1})}; \quad (3)$$

$$h = \frac{Z'_2 - Z'_1 + \sqrt{\frac{2}{\mu\omega_1\omega_2\rho_{под}}} Z'_1 Z'_2 (V\sqrt{\omega_1} - V\sqrt{\omega_2})}{\sqrt{\frac{2\mu}{\rho_{под}}} (Z'_1 V\sqrt{\omega_2} - Z'_2 V\sqrt{\omega_1})}, \quad (4)$$

где Z'_1, Z'_2 — реактивные части импедансов на частотах ω_1 и ω_2 .

Относительные погрешности измерения величин $\rho_{пл}$ и h при условии, что $\omega_2 = n\omega_1$, получаются из выражений (3) и (4):

$$\left(\frac{\Delta\rho_{пл}}{\rho_{пл}}\right)^2 = \left\{ \frac{1}{1 + \left[Z'_1 \left(\frac{1 - \sqrt{n}}{\sqrt{\frac{\mu\omega_1 n\rho_{под}}{2}}} - \frac{1}{Z'_2} \right) \right]^{-1}} \right\} +$$

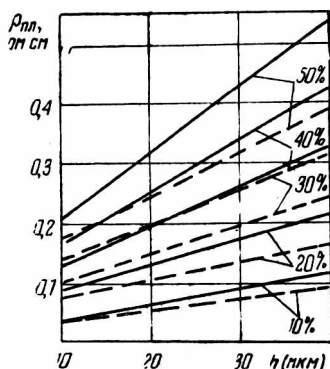


Рис. 1. Область применимости метода измерения удельного сопротивления тонких эпитаксиальных пленок.

Обозначения:

— $\lambda = 4$ мм;
 - - - $\lambda = 8$ мм;
 $\rho_{под} = 10^{-2}$ ом·см.

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{\frac{1}{nZ_1'} \left[Z_2' + \sqrt{\frac{\mu\omega_1 n \rho_{\text{под}}}{2}} (\sqrt{n} - 1) \right] - 1} \left. \right\}^2 \left(\frac{\Delta l_1}{l_1} \right)^2 + \\
& + \left\{ \frac{1}{1 - \left[Z_2' \left(\frac{1 - \sqrt{n}}{\sqrt{\frac{\mu\omega_1 n \rho_{\text{под}}}{2}}} + \frac{1}{Z_1'} \right) \right]} \right. + \\
& + \left. \frac{1}{\frac{1}{Z_2'} \left[nZ_2' - \sqrt{\frac{\mu\omega_1 n \rho_{\text{под}}}{2}} (\sqrt{n} - 1) \right] - 1} \right\}^2 \left(\frac{\Delta l_2}{l_2} \right)^2; \quad (5)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\left(\frac{\Delta h}{h} \right)^2 & = \left\{ \frac{1}{1 + \left[Z_1' \left(\frac{1 - \sqrt{n}}{\sqrt{\frac{\mu\omega_1 n \rho_{\text{под}}}{2}}} - \frac{1}{Z_2'} \right) \right]} \right. + \\
& + \left. \frac{1}{\sqrt{n} \left(\frac{Z_2'}{Z_1'} - \sqrt{n} \right)} \right\}^2 \left(\frac{\Delta l_1}{l_1} \right)^2 + \\
& + \left\{ \frac{1}{1 - \left[Z_2' \left(\frac{1 - \sqrt{n}}{\sqrt{\frac{\mu\omega_1 n \rho_{\text{под}}}{2}}} + \frac{1}{Z_1'} \right) \right]} + \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{n}Z_1'} - 1} \right\}^2 \left(\frac{\Delta l_2}{l_2} \right)^2, \quad (6)
\end{aligned}$$

где l_1, l_2 — сдвиг поршня резонатора на частотах ω_1 и ω_2 .

В табл. 1 представлены вычислительные погрешности удельного сопротивления кремниевых пленок ($\rho_{\text{под}} = 10^{-4}$ ом·м) при $\lambda_1 = 32, \lambda_2 = 4$ мм и разных значениях h .

Таблица 1

$h, \text{ мкм}$	15	20	25	30
$\rho_{\text{пл.}}, \text{ ом}\cdot\text{см}$				
0,1	33,5%	22%	13,5%	12,8%
0,2	65,6%	42,1%	30,6%	23,9%
0,3	98,7%	62,6%	44,5%	35%
0,4	132,4%	83,5%	59,8%	46,2%

На величину погрешности $\rho_{пл}$ существенным образом влияет выбор нижней рабочей частоты и соотношения между частотами, что видно из рис. 2.

В случае независимых измерений, который возможен при выполнении условия

$$\frac{1}{\sqrt{\mu\omega_1 \rho_{под}}} \gg \frac{h\sqrt{2}}{\rho_{пл}}, \quad (7)$$

значение толщины пленки h определяется из Z_1'' , т. е. по одному измерению на нижней частоте ω_1 , а значение удельного сопротивления $\rho_{пл}$ — из Z_1'' и Z_2'' .

Выражения для $\rho_{пл}$ и h пленки при этом принимают вид

$$\rho_{пл} = \frac{\frac{Z_2'}{\mu\omega_1} (Z_1' \sqrt{2} - \sqrt{\mu\omega_1 \rho_{под}})}{\frac{1}{\sqrt{2}} \left(1 - \sqrt{\frac{\omega_2}{\omega_1}}\right) + \frac{1}{\sqrt{\mu\omega_1 \rho_{под}}} (Z_1' \frac{\omega_2}{\omega_1} - Z_2')} ; \quad (8)$$

$$h = \frac{Z_1'}{\mu\omega_1} - \sqrt{\frac{\rho_{под}}{2\mu\omega_1}}, \quad (9)$$

а выражения для погрешности измерения этих величин в случае $\omega_2 = n\omega_1$ будет

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta\rho_{пл}}{\rho_{пл}}\right)^2 = & (Z_1')^2 \left[\frac{1}{Z_1' - \sqrt{\frac{\mu\omega_1 \rho_{под}}{2}}} - \right. \\ & \left. - \frac{1}{Z_1' - \frac{Z_2'}{n} + \sqrt{\frac{\mu\omega_1 \rho_{под}}{2n}} (1 - \sqrt{n})} \right]^2 \left(\frac{\Delta l_1}{l_1}\right)^2 + \\ & + (Z_2')^2 \left[\frac{1}{Z_2'} - \frac{1}{nZ_1' - Z_2' + \sqrt{\frac{n\mu\omega_1 n \rho_{под}}{2}} (1 - \sqrt{n})} \right]^2 \left(\frac{\Delta l_2}{l_2}\right)^2 ; \quad (10) \end{aligned}$$

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{1}{1 - \frac{1}{Z_1'} \sqrt{\frac{\mu\omega_1 \rho_{под}}{2}}} \cdot \frac{\Delta l_1}{l_1}. \quad (11)$$

Входящие в формулы (3)–(11) Z_1'' и Z_2'' измеряются при помощи описанного в [2] СВЧ-резонаторного датчика по сдвигу резонансного положения настроенного поршня. На любой частоте справедливо следующее выражение:

$$Z'' = \left(\frac{\beta_0}{\beta_{тр}}\right)^2 Z_0 \operatorname{tg} \beta_0 l, \quad (12)$$

где Z_0 — волновое сопротивление пустой части резонатора;
 β_0 — постоянная распространения пустой части резонатора,
 $\beta_{тр}$ — постоянная распространения в материале трансформатора.

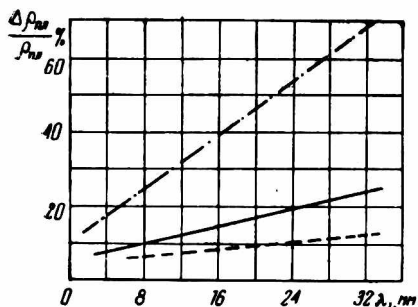


Рис. 2. Влияние нижней рабочей частоты на погрешность:
 Обозначения:
 - - - - $\lambda_1 = 2 \lambda_2$;
 ————— $\lambda_1 = 4 \lambda_2$;
 - - - - $\lambda_1 = 8 \lambda_2$.

В табл. 2 приведены вычисленные погрешности удельного сопротивления при тех же частотах и параметрах пленки, что и в случае совместных измерений. Уменьшение погрешности в случае независимых измерений $\rho_{пл}$ объясняется исключением вклада в погрешность ошибки измерения на нижней рабочей частоте, которая очень велика из-за малого влияния $\rho_{пл}$ на Z'' .

Анализ приведенных выше выражений позволяет сделать следующий вывод о применимости рассмотренного неразрушающего мето-

да контроля параметров эпитаксиальных пленок на сильнолегированных подложках.

Т а б л и ц а 2

$h, \text{мкм}$	5	10	15	20	25	30
$\rho_{пл}, \text{ом} \cdot \text{см}$						
0,1	23,3%	17,3%	10,6%	7,3%	5,6%	4,4%
0,2	75%	36,2%	21,9%	15,5%	11,9%	10,3%
0,3	117,8%	54,5%	33,9%	25,2%	18,7%	14,7%
0,4	180,5%	71,3%	46,2%	30,8%	25,3%	20,2%

Метод обеспечивает однопараметровый контроль проводимости пленок больше $25 \text{ ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ при толщине их выше 10 мкм с погрешностью ниже 10% . Двухпараметровый контроль с погрешностью измерения $\rho_{пл}$ меньше 5% возможен при условии (7). Если это условие не выполняется, измерения имеют более высокую погрешность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковтонюк Н. Ф., Концевой Ю. А. Измерение параметров полупроводниковых материалов. М., «Металлургия», 1970. 156 с.
2. Гордиенко Ю. Е., Старостенко В. В., Бурдукова С. С. Из-

мерение толщины эпитаксиальных полупроводниковых пленок на низкоомных подложках. — «Электронная техника». Сер. 8, 1972; вып. 10, с. 22—26.

3. Григулис Ю. К. Электромагнитный метод анализа сложных полупроводниковых и металлических структур. Рига, «Зинатне», 1970. 269 с.