

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  $\alpha$ ,  $\beta$  — 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  $\omega_1$  и  $\omega_2$ .

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

$$\left(\frac{\Delta\rho_{пл}}{\rho_{пл}}\right)^2 = \left\{ \frac{1}{1 + \left[ Z_1' \left( \frac{1 - \sqrt{n}}{\sqrt{\frac{\mu\omega_1 n\rho_{под}}{2}}} - \frac{1}{Z_2'} \right) \right]^{-1}} \right\} +$$

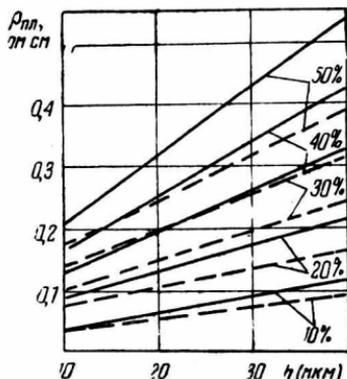


Рис. 1. Область применимости метода измерения удельного сопротивления тонких эпитаксиальных пленок.

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  $\omega_1$  и  $\omega_2$ .

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

$h$ , мкм	15	20	25	30
$\rho_{\text{пл.}}$ , ом·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  $\omega_1$ , 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;  
 $\beta_0$  — постоянная распространения пустой части резонатора,  
 $\beta_{тр}$  — постоянная распространения в материале трансформатора.

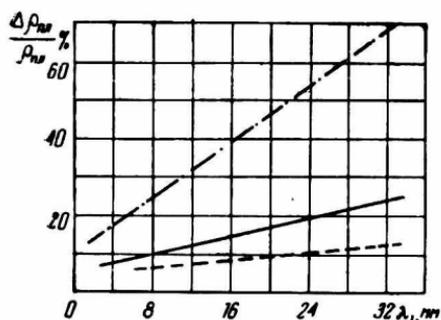


Рис. 2. Влияние нижней рабочей частоты на погрешность:

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  $10 \text{ мкм}$  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.