

УДК 621.382 : 621.317.3

**П. А. Бородовский, А. Ф. Булдыгин**

*(Новосибирск)*

### **СВЧ-КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СТРУКТУР КРЕМНИЙ НА САПФИРЕ**

Предлагается использование бесконтактного метода измерения тангенса потерь гетероэпитаксиальных структур кремний на сапфире (КНС) на сверхвысоких частотах (СВЧ) для оценки качества пленок КНС. Тангенс потерь определяется по измеренной величине изменения добротности СВЧ-резонатора с колебаниями типа  $H_{011}$  при размещении в нем образца. Полученные экспериментальные результаты показывают, что СВЧ-метод позволяет оценить качество пленок КНС для МОП-транзисторов и интегральных схем КНС.

Эпитаксиальные структуры кремний на сапфире (КНС) используются в производстве интегральных схем с начала 70-х годов. Благодаря непрерывному совершенствованию технологии в последние годы получены пленки КНС высокого качества толщиной до 0,2–0,1 мкм [1]. Однако проблема входного контроля качества промышленных КНС-структур остается актуальной. Пленки КНС по своей природе неоднородны: верхняя часть пленки по свойствам подобна объемному кремнию, а нижняя часть вследствие сильного возрастания плотности дефектов в направлении к подложке имеет низкое качество, особенно вблизи границы раздела пленка – подложка. В МОП-транзисторах практически используется только верхний канал с достаточно высокой подвижностью носителей заряда, но в режиме полного обеднения начинает влиять нижний канал, примыкающий к подложке. Паразитная проводимость этого канала увеличивает токи утечки и шумы МОП-транзистора. Для исследования границы раздела пленка – подложка применяются различные методы, но все они непригодны для входного контроля, так как требуют изготовления МОП-конденсаторов или МОП-структур с омическими контактами.

Для неразрушающего входного контроля полупроводниковых структур наряду с оптическими методами в настоящее время достаточно широко применяются и измерения на сверхвысоких частотах (СВЧ).

В работе [2] проведены теоретический анализ и расчеты для пленок германия с диэлектрической подложкой на частотах 9 и 23 ГГц. Показано, что при толщине пленки ~1 мкм подложка очень сильно влияет на величину потерь СВЧ-мощности и требуются весьма сложные расчеты для определения удельного сопротивления пленки  $\rho$  по измеренной величине поглощенной СВЧ-мощности. Сравнение измеренных значений  $\rho$  на постоянном токе с

результатами расчетов дает очень большое расхождение даже при  $\rho \approx 0,1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ .

В данной работе приведены результаты исследований возможности использования СВЧ-метода для входного контроля КНС-структур в условиях производства. При СВЧ-измерениях КНС-структуры на частотах ниже 10 ГГц можно рассматривать как пластины диэлектрика с диэлектрической проницаемостью сапфира ( $\epsilon_r \sim 10$ ) и тангенсом потерь

$$\text{tg} \delta = \frac{1}{\omega \epsilon_r \epsilon_0 d R_{\square}} \approx \frac{1800}{f \epsilon_r d R_{\square}}, \quad (1)$$

где  $f$  – частота в ГГц;  $d$  – толщина подложки в см;  $R_{\square}$  – сопротивление пленки в Ом/□.

Например, для КНС-структуры с толщиной пленки  $\Delta = 0,6 \text{ мкм}$ ,  $\rho = 4,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ,  $R_{\square} = \rho/\delta = 75 \text{ Ом}/\square$ ,  $d = 5 \cdot 10^{-2} \text{ см}$ ,  $f = 5 \text{ ГГц}$ ,  $\epsilon_r = 10$ , величина  $\text{tg} \delta = 9,6 \cdot 10^{-3}$ . Потери в подложке из сапфира при  $\text{tg} \delta < 10^{-4}$  дают  $R_{\square} > 7,2 \text{ МОм}/\text{см}^2$ . В исходном состоянии вследствие поверхностного заряда на свободной границе пленки имеется обедненный слой, толщина которого сравнима с толщиной пленки. Это следует из простых оценок максимальной ширины обедненного слоя [3]:

$$W_{\max} = \sqrt{\frac{2\epsilon_r \epsilon_0 \psi_{\max}}{eN}}, \quad \psi_{\max} \approx \frac{2kT}{e} \ln(N/n_i). \quad (2)$$

При уровне легирования  $N \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и собственной концентрации электронов для кремния  $n_i = 1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$  [3] мы имеем  $\psi_{\max} = 0,594 \text{ В}$  и  $W_{\max} \approx 0,876 \text{ мкм}$ . Таким образом, в исходном состоянии вследствие обедняющего изгиба зон на свободной поверхности пленки сопротивление КНС-структуры  $R_{\square}$  будет определяться «паразитной» проводимостью нижнего канала и тангенсом потерь в подложке. Можно полагать при этом, что КНС-структура достаточно высокого качества (малые токи утечки в МОП-транзисторе) должна иметь  $R_{\square} > 10 \text{ МОм}/\square$ .

Методика измерения  $\epsilon_r$  и  $\text{tg} \delta$  диэлектрических пластин на СВЧ достаточно хорошо разработана, и для этой цели часто используются цилиндрические резонаторы на волне типа  $H_{01}$ . Такой тип волны имеет определенные преимущества вследствие отсутствия аксиальной составляющей тока на боковой поверхности и радиальной на основаниях резонатора. Это позволяет использовать резонатор из двух разъемных частей, между которыми помещается диэлектрическая пластина. Для волны  $H_{01}$  также несуществен и контакт между поршнем настройки и боковой поверхностью резонатора, что позволяет применять бесконтактный поршень.

Измерения КНС-структур диаметром 4 дюйма проводились в резонаторе диаметром 98 мм, изготовленном из алюминиевой болванки в виде двух частей: нижней глубиной  $l_1 = 23,8 \text{ мм}$  и верхней с бесконтактным поршнем, перемещающимся с помощью микрометрического винта. Без образца на частотах  $\sim 5 \text{ ГГц}$  собственная добротность резонатора достаточно высокая ( $Q_0 \geq 20000$ ), что позволило измерить  $\text{tg} \delta$  до  $10^{-5}$ .

В случае высокой добротности резонаторов обычно используют динамические методы измерения резонансной кривой на экране осциллографа при частотной модуляции СВЧ-сигнала. В нашем случае для измерения полосы частот на уровне половинной мощности  $2\Delta f_{0,5}$  использовались анализатор спектра с калиброванными частотными метками и генератор сигналов СВЧ с частотной модуляцией. Резонансная частота измерялась гетеродинным частотомером. В случае более низких добротностей ( $2\Delta f_{0,5} > 3$  МГц) проводились измерения частоты в точках половинной мощности при перестройке частоты генератора.

В первых измерениях мы использовали прецизионный резонансный метод, теория которого рассмотрена в работе [4]. Значения  $\epsilon_r$  и  $\text{tg}\delta$  определялись из измерений на одной и той же резонансной частоте резонатора с образцом и без образца. В последнем случае увеличивалась длина резонатора перемещением поршня. Результаты измерений и расчетов для трех 4-дюймовых КНС-структур приведены в табл. 1. Расчеты проводились по достаточно громоздким формулам из [4], которые здесь не приводятся. Из полученных результатов следует, что заметную проводимость канала у подложки имеет первая структура. Для более точной оценки сопротивления пленки у двух остальных структур необходимы измерения  $\text{tg}\delta$  самой подложки.

Интересно отметить, что проводимость верхней части пленки КНС восстанавливается после кратковременной (30 с) обработки в концентрированной плавиковой кислоте (HF). Динамика изменения сопротивления после обработки в HF одной из КНС-структур (2/4) приведена на рис. 1. В начальный момент (в течение первых 5 мин после обработки) значение  $R_{\square} = 94,5$  кОм/□ ( $2\Delta f_1 = 9$  МГц) близко к значению сопротивления пленки в режиме плоских зон, т. е. соответствует уровню, определяемому легированием ( $N_d \sim 10^{15}$  см<sup>-3</sup>). Далее в течение примерно двух часов проводимость пленки КНС непрерывно уменьшается вследствие обеднения при формировании отрицательного поверхностного заряда. Насыщение достигается при  $R_{\square} \sim 10$  МОм/□ ( $2\Delta f_1 = 0,31$  МГц). Как видно из табл. 1, после длительного хранения  $R_{\square} \approx 12,5$  МОм/□.

Определение  $R_{\square}$  по  $\text{tg}\delta$  для КНС-пластин при входном контроле их качества не требует высокой точности, и можно использовать другой вариант с приближенными, но простыми формулами для расчета  $\epsilon_r$  и  $\text{tg}\delta$ . Пластина КНС в этом случае помещается в области максимума электрического поля резонатора с фиксированной длиной  $L$  ( $l_1 = l_2 = L/2$ ), и проводятся измере-

Т а б л и ц а 1

Образец	$d$ , мкм	$f_0$ , МГц	$(2\Delta f_1)_{0,5}$ , МГц	$(2\Delta f_0)_{0,5}$ , МГц	$\epsilon_r$	$\text{tg}\delta$	$R_{\square}$ , МОм/□
КНС 1/4	630	4555,8	0,28	0,18	10,05	$9,1 \cdot 10^{-5}$	6,8
КНС 2/4	500	4679,8	0,28	0,19	9,9	$6,2 \cdot 10^{-5}$	12,5
КНС 3/4*	500	4682,6	0,28	0,19	9,9	$6,2 \cdot 10^{-5}$	12,5

П р и м е ч а н и е. Толщина пленки  $\Delta = 0,3$  мкм.

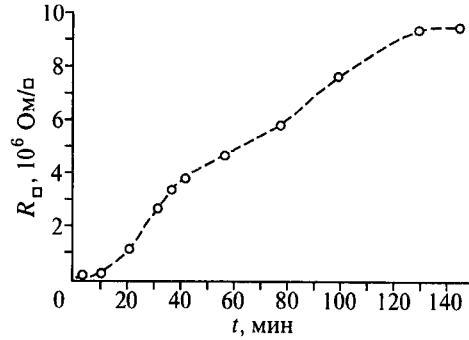


Рис. 1. Изменение эквивалентного сопротивления СВЧ-потерь КНС-структуры после обработки ее в концентрированной плавиковой кислоте (см. табл. 1, КНС 2/4)

ния резонансных частот  $f_0$ ,  $f_1$  и полосы частот  $2\Delta f_0$ ,  $2\Delta f_1$  на уровне 0,5 для пустого резонатора и с образцом соответственно. Формулы для расчета  $\epsilon_r$  и  $\text{tg}\delta$ , полученные в работе [5] на основе метода возмущений, имеют следующий вид:

$$\epsilon_r = 1 + \frac{L}{d} \left( \frac{f_0 - f_1}{f_1} \right) F\left(\frac{b}{a}\right), \quad (3)$$

$$\text{tg}\delta = \frac{1}{\epsilon_r} \frac{L}{2d} \left( \frac{2\Delta f_1}{f_1} - \frac{2\Delta f_0}{f_0} \right) F\left(\frac{b}{a}\right), \quad (4)$$

где  $F(b/a)$  – коэффициент, определяемый через функции Бесселя [5]. При радиусе диэлектрической пластины  $b \geq a$  (радиус резонатора) величина  $F(b/a) = 1$ .

Расчет на основе метода возмущения достаточно точен при условиях, если объем образца мал и смещение резонансной частоты  $\Delta\omega/\omega \ll 1$ . В нашем случае малость определяется величиной  $\epsilon_r d/L$  при  $F(b/a) \approx 1$  и относительное смещение частоты может достигать 10 %. Для оценки погрешности определения  $\epsilon_r$ ,  $\text{tg}\delta$  были проведены измерения и расчеты двумя методами для одной из КНС-структур (2/4). Расхождение в результатах при этом составило 6 % для величины  $\epsilon_r$  и не более 25 % для  $\text{tg}\delta$ . В табл. 2 приведены результаты измерений и расчета значений  $\epsilon_r$  и  $\text{tg}\delta$  по формулам (3), (4) для шести КНС-структур диаметром 3 дюйма, а также для пластины сапфира (без пленки). Измерения проводились в резонаторе диаметром 82 мм, изготовленном из алюминия в виде двух одинаковых частей с осевой длиной  $l_1 = l_2 \approx 20$  мм. Добротность пустого резонатора  $Q_0 \approx 19400$ , что достигалось малыми размерами входной и выходной петель связи. Из полученных результатов следует, что две КНС-структуры 5/3 и 6/3 явно имеют низкое качество ( $R_\square < 10$  МОм/□) и должны быть отбракованы. Отметим также, что  $R_\square$ , учитывающие только потери сапфира, можно полагать  $\sim 20$  МОм/□.

В этом же резонаторе проведены измерения и КНС-структур диаметром 2,5 дюйма, при этом в расчетах необходимо уже использовать поправочный коэффициент  $F(b/a) = 1,1835$ . Приведенные в табл. 3 результаты показывают, что только одна из исследованных КНС-структур имеет достаточно высокое качество. Отметим также, что для увеличения уровня СВЧ-сигнала, про-

Таблица 2

Образец	$d$ , мкм	$f_1$ , МГц	$(2\Delta f_1)_{0,5}$ , МГц	$\epsilon_r$	$\text{tg}\delta$	$R_{\square}$ , МОм/ $\square$
КНС 1/3	485	5260	0,34	9,78	$5,5 \cdot 10^{-5}$	13
КНС 2/3	450	5297	0,32	9,77	$4 \cdot 10^{-5}$	19
КНС 3/3	450	5302	0,36	9,68	$7,5 \cdot 10^{-5}$	11
КНС 4/3	490	5301	0,34	9,0	$5,7 \cdot 10^{-5}$	13,5
КНС 5/3	490	5253	0,46	9,8	$1,5 \cdot 10^{-4}$	4,75
КНС 6/3	485	5249	0,44	9,96	$1,3 \cdot 10^{-4}$	5,3
Сапфир	370	5392	0,32	9,57	$4,8 \cdot 10^{-5}$	19,6

Примечание.  $f_0 = 5819,6$  МГц;  $(2\Delta f_0)_{0,5} = 0,3$  МГц.

ходящего через резонатор с образцом, были немного увеличены размеры петель связи. Это несколько уменьшило резонансную частоту и добротность пустого резонатора (см. табл. 3).

«Остаточная проводимость» КНС-структур ( $1/R_{\square}$ ) зависит от температуры. На рис. 2 представлены в полулогарифмическом масштабе температурные зависимости ( $1/R_{\square}$ ) в интервале 25–150 °С для двух КНС-структур. Экспериментальные точки достаточно хорошо согласуются с экспоненциальной зависимостью  $1/R_{\square} \sim \sigma \sim \exp(-E_T/kT)$ . Такой «барьерный» тип проводимости характерен для поликремния и, следовательно, нижняя часть пленки с высокой плотностью дефектов аналогична по свойствам поликремнию. Этот вопрос достаточно подробно обсуждался в [6], где приведены температур-

Таблица 3

Образец	$d$ , мкм	$f_1$ , МГц	$(2\Delta f_1)_{0,5}$ , МГц	$\epsilon_r$	$\text{tg}\delta$	$R_{\square}$ , МОм/ $\square$
КНС 1/2,5	410	5371,8	0,4	10,6	$3,1 \cdot 10^{-5}$	24,7
КНС 2/2,5	475	5346,5	0,75	9,8	$3 \cdot 10^{-4}$	2,3
КНС 3/2,5	465	5331,7	1,1	10,3	$6,8 \cdot 10^{-4}$	1,0
КНС 4/2,5	515	5284,5	0,8	10,2	$3,7 \cdot 10^{-4}$	1,7
КНС 5/2,5	435	5353	0,6	10,46	$2,2 \cdot 10^{-4}$	3,9

Примечание.  $f_0 = 5818,5$  МГц;  $(2\Delta f_0)_{0,5} = 0,4$  МГц.

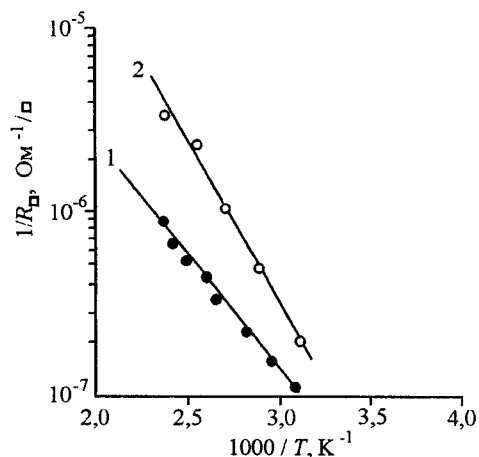


Рис. 2. Температурные зависимости изменения «проводимости» СВЧ-потерь ( $1/R_Q$ ) для КНС 2/4 (1) и КНС 6/3 (2) (см. табл. 1, 2)

ные зависимости тока МОП-резистора при различных потенциалах затвора в диапазоне температур 100–300 К.

При СВЧ-измерениях с резонатором на волне  $H_{01}$  может возникнуть проблема, связанная с паразитными резонансами, поскольку  $H_{01}$  не является наименьшим типом волны. Однако известны способы подавления паразитных резонансов, например, использование четвертьволновых дросселей в качестве торцевых стенок резонатора [7] или кольцевого зазора, заполненного поглощающим материалом [8]. В нашем случае для простоты эти меры не применялись и ошибки, связанные с паразитными резонансами, исключались сравнением измеренной резонансной частоты с расчетным значением. Паразитный резонанс на волне  $E_{11}$ , имеющий место на одинаковой частоте с  $H_{01}$ , подавлялся соответствующей ориентацией и расположением петель связи.

В заключение отметим, что на основе СВЧ-измерений КНС-структур получены следующие результаты.

1. Показано, что в исходном состоянии проводимость определяется нижней частью пленки КНС и границей раздела пленка – подложка вследствие обедняющего изгиба зон на свободной поверхности верхней части пленки. По свойствам нижняя часть пленки КНС близка к поликремнию, что следует из температурной зависимости проводимости, полученной на основе СВЧ-измерений.

2. Проводимость верхней части пленки КНС можно кратковременно восстановить до величины, определяемой уровнем легирования после обработки в концентрированной плавиковой кислоте.

3. Предложен простой метод входного контроля качества КНС-структур на основе СВЧ-измерений резонансной частоты и добротности резонатора с КНС-структурой и без нее.

Авторы выражают благодарность М. Д. Ефремову, С. И. Романову и В. А. Самойлову за предоставление КНС-структур для СВЧ-измерений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Colinge J. P.** Silicon-on-insulator Technology: Material to VLSI. Boston – Dordrecht – London: Kluwer Academic Publishers, 1999.
2. **Covington D. W., Ray D. C.** The influence of substrate properties on microwave losses in thin film of semiconductors // Solid State Electron. 1973. 16. P. 301.
3. **Зи С.** Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. Т. I.
4. **Saito S., Kurokawa E.** A precision resonance method for measuring dielectric properties of low-loss solid materials in microwave region // Proc. IRE. 1956. 44, N 1. P. 35.
5. **Ерофеичев В. Г., Курбатов Л. Н.** Электропроводность и диэлектрическая проницаемость слоев сульфида свинца на  $f = 10^{10}$  Гц // Физика твердого тела: Сб. статей. М., 1959. Ч. I. С. 133.
6. **Heteroepitaxial Semiconductor for Electronic Devices** /Ed. by G. M. Cullen, C. C. Wang. Berlin: Springer, 1978.
7. **Guillon P., Garault Y.** Complex permittivity measurement of MIC substrate // АЕУ. 1981. 35, N 3. S. 102.
8. **Орлов С. В., Левин А. Д.** Безэлектродный метод измерения комплексной диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрических пленок на СВЧ // Электрон. техника. Сер. Электроника СВЧ. 1988. № 1. С. 43.

*Институт физики полупроводников СО РАН,  
E-mail: seleznev@isp.nsc.ru*

*Поступила в редакцию  
13 июля 2001 г.*