

## ПОЛУЧЕНИЕ ПЛЕНОК $\text{CoSi}_2/\text{Si}$ (100) И АНАЛИЗ ИХ МОРФОЛОГИИ И СТЕХИОМЕТРИИ МЕТОДАМИ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ, ТВЕРДОФАЗНОЙ И РЕАКТИВНОЙ ЭПИТАКСИИ

*Ташкентский государственный технический университет,  
ул. Университетская, 2, г. Ташкент, 700095, Республика Узбекистан*

Проблема формирования тонких эпитаксиальных слоев металла на полупроводниках с высоким совершенством структуры в настоящее время привлекает пристальное внимание исследователей. Существует весьма ограниченный набор комбинаций «металл–полупроводник», который позволяет реализовать эпитаксиальный рост металлической пленки на полупроводниковой подложке.

Изучение эпитаксиальных структур  $\text{CoSi}_2/\text{Si}$  и  $\text{NiSi}_2/\text{Si}$  имеет большое значение для понимания электрофизических процессов, происходящих на границе раздела металл–полупроводник, так как данные структуры являются единственными, для которых теоретические выражения для высоты барьера Шоттки могут быть получены непосредственно из расчетов, основанных на расположении атомов в реальной структуре [1].

Перспективы практического применения эпитаксиальных силицидов в микроэлектронике связаны прежде всего с созданием кремниевого СВЧ-транзистора с проникаемой базой, формированием барьеров Шоттки, омических контактов и межсоединений ИС. Весьма привлекательной является также возможность создания фотодиода с барьером Шоттки на основе структуры  $\text{CoSi}_2/\text{Si}$ .

Актуальность работы связана с существованием ряда нерешенных вопросов как с точки зрения технологии эпитаксиального роста, так и с точки зрения понимания физики роста и влияния структуры на физические свойства пленок силицидов, применение которых открывает новые возможности для создания приборных структур с уникальными техническими характеристиками.

Дальнейшее развитие микроэлектроники требует новые неординарные материалы, обеспечивающие увеличение степени интеграции микросхем и развитие функциональной электроники. В этом плане более перспективными материалами являются силициды.

Основная цель данной работы – выявление механизмов образования силицидных структур при МЛЭ, ТФЭ, РЭ и получение пленок, а также морфологии и стехиометрии. В статье приводятся результаты исследования эпитаксиальных структур  $\text{CoSi}_2/\text{Si}$  (100), сформированных методами МЛЭ, ТФЭ и РЭ. Слои силицида кобальта выращивались на подложках типа КЭФ-4,5, КДБ-7,5 и КДБ-12. Рост пленок производился в сверхвысоковакуумной установке МЛЭ. Перед эпитаксиальным ростом поверхность подложек подвергалась химической отмывке и специальной очистке в вакууме. Подробное описание установки МЛЭ и методов очистки содержится в работе [2]. Толщина осажденного кобальта во всех случаях составляла 100 Å, при этом образовывалась пленка  $\text{CoSi}_2$  толщиной около 380 Å. Исследовались процессы одностадийного и двухстадийного роста. При двухстадийном росте увеличение пленки проходило в два этапа с разными режимами роста.

В настоящее время предложены различные методы вакуумной эпитаксии силицидов на кремнии. Среди них можно выделить: молекулярно-лучевую эпитаксию (МЛЭ) – одновременное осаждение металла и кремния из двух молекулярных пучков на нагретую подложку кремния; твердофазную эпитаксию (ТФЭ) – осаждение металла на очищенную поверхность кремния и последующий нагрев до температур образования силицида; реактивную эпитаксию (РЭ) – осаждение металла на нагретую подложку кремния.

Анализ пленок, выращенных различными методами, показывает, что морфология и стехиометрия пленок критическим образом зависят от условий роста.

С точки зрения морфологии пленок  $\text{CoSi}_2/\text{Si}$  можно выделить три основных типа:

- 1) сплошные пленки  $\text{CoSi}_2$ ;
- 2) пленки с микроскопическими отверстиями;

3) островковые пленки.

По различию в стехиометрии  $\text{CoSi}_2$  выделяют две фазы [3]:

1)  $\text{CoSi}_2$ , обогащенный кремнием ( $\text{CoSi}_2\text{-S}$ );

2)  $\text{CoSi}_2$ , обогащенный кобальтом ( $\text{CoSi}_2\text{-C}$ ).

Установление связи между морфологией, стехиометрией и условиями роста структур  $\text{CoSi}_2/\text{Si}$  имеет большое значение при создании на основе данных эпитаксиальных слоев приборных структур. В большинстве случаев ставится задача получения максимально однородных слоев, однако в ряде применений представляет интерес формирование пленок с отверстиями субмикронных размеров с управляемыми морфологическими характеристиками. В работе [4] предлагается способ изготовления транзистора с проницаемой базой, в котором роль отверстий в металлической базе играют естественные субмикронные отверстия в пленке  $\text{CoSi}_2$ . Предлагается выражение, связывающее коэффициент передачи тока  $\alpha$  транзистора с коэффициентом покрытия  $\theta$  в системе  $\text{CoSi}_2/\text{Si}$ :

$$\alpha = \frac{\xi}{\gamma + \xi}, \quad (1)$$

где

$$\gamma = \frac{1 - \theta}{\theta},$$

$$\varepsilon = kT / e\Delta_0 [\exp(e\Delta_0 / kT) - 1].$$

Здесь  $\Delta_0$  – изменение величины барьера Шоттки в центре отверстия ( $\Delta_0 = f(x)$ ;  $x$  – средний диаметр отверстий). Таким образом, изменяя условия роста пленки  $\text{CoSi}_2$ , можно регулировать величины  $x$  и  $\theta$  и, следовательно, управлять коэффициентом передачи тока  $\alpha$ .

Стехиометрия пленок  $\text{CoSi}_2$  влияет на электрофизические свойства, в частности на высоту барьера Шоттки и удельное сопротивление.

Структура поверхности в процессе роста контролировалась методом дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭ). Выращенные образцы анализировались методом Оже – электронной спектроскопии (ОЭС). Поверхностное сопротивление  $R_s$  измерялось 4-зондовым методом. Из Оже-профиля образца определялись отношения интенсивностей Оже-сигналов кобальта и кремния в пленке  $\text{CoSi}_2$ , а также кремния в  $\text{CoSi}_2$  и кремния подложки. Оже-профили образцов приведены на рис. 1, режимы роста силицида и результаты анализа – в таблице.

*Режимы роста, результаты ОЭС-анализа стехиометрии и морфологии поверхностного сопротивления пленок  $\text{CoSi}_2/\text{Si}$  (100)*

№ обр.	Тип подложки	$h_{\text{CoSi}_2}, \text{ \AA}$	Тип эпитаксии	$T_s, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{\text{отж}}, \text{ мин}$	Скор. осажд., $\text{ \AA / с}$	$I_{\text{Co}}/I_{\text{Si}}$	$I_{\text{Si}}/I_{\text{Si П}}$	$\theta$	$R_s, \text{ мКОм}\cdot\text{см}$
1	КДБ-7,5	105 105	РЭ РЭ	633 660	– –	2 2	0,52	0,93	0,43	18
2	КДБ-7,5	210	ТФЭ	575	5	2	0,47	0,88	0,87	25
3	КЭФ-4,5	210	ТФЭ	610	7	2	0,54	0,87	0,83	25
4	КЭФ-4,5	105 105	РЭ РЭ	580 562	– –	2 2	0,89	0,78	0,95	8
5	КДБ-12	210	ТФЭ	630	7	2	0,65	0,94	0,29	23

Обозначения:  $h_{\text{CoSi}_2}$  – толщина слоя кобальта, осажденного на подложки;  $T_s$  – температура подложки при эпитаксии;  $t_{\text{отж}}$  – время отжига структуры при ТФЭ.

С учетом данных Оже-спектроскопии была сделана попытка оценить коэффициент покрытия подложки пленкой силицида кобальта. Получено выражение, связывающее с интенсивностями Оже-сигналов кремния и кобальта:

$$\theta = 3(1 - I_{\text{Si}} / I_{\text{Si П}}) I_{\text{Si}} / I_{\text{Co}}, \quad (2)$$

где  $I_{\text{Co}}$  – интенсивность Оже-сигнала кобальта в  $\text{CoSi}_2$  (765 эВ);  $I_{\text{Si}}$  – интенсивность Оже-сигнала кремния в  $\text{CoSi}_2$  (91 эВ);  $I_{\text{Si П}}$  – интенсивность Оже-сигнала кремния в подложке (91 эВ).

Значения отношений интенсивностей  $I_{Co}/I_{Si}$  и  $I_{Si}/I_{sin}$ , а также величина  $\theta$ , рассчитанная по формуле (2), приведены в таблице.

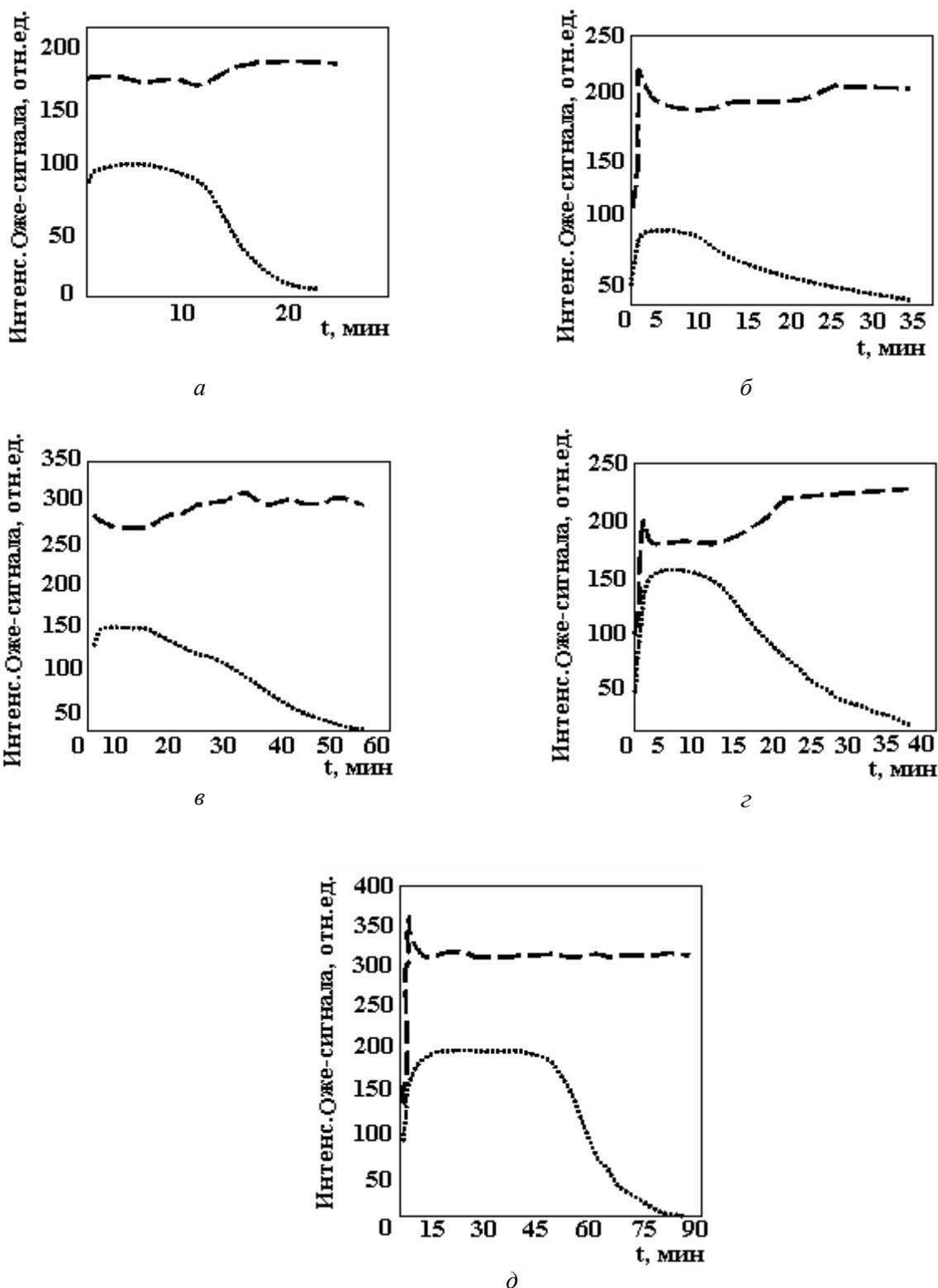


Рис. 1. Режим роста и Оже-профили образцов  $CoSi_2/Si$  (номера образцов 1–5 в табл. соответствуют Оже-профилям на рис. 1)

Следует отметить, что формула (2) была получена на основании весьма грубых приближений, в частности, при изменении стехиометрии не нарушается объемная (и поверхностная) плотность атомов (то есть при нарушении стехиометрии происходит замещение атомов одного сорта другими в

узлах кристаллической решетки, возможность наличия атомов в междоузлиях не учитывается). Так, в случае образцов *a* и *d* формула дает явно заниженные значения коэффициента покрытия. С другой стороны, более низкое значение у образца *d* подтверждается данными ДБЭ. На дифракционной картине наряду с рефлексами от монокристаллической поверхности  $\text{CoSi}_2$  наблюдались рефлексы, соответствующие реконструированной поверхности  $\text{Si}(100) 2 \times 1$ , что свидетельствует о значительной площади кремниевой подложки, не закрытой пленкой силицида. Таким образом, формула (2) позволяет на качественном уровне анализировать коэффициенты покрытия, получающиеся при разных режимах роста.

Оже-профили (рис. 1) свидетельствуют о формировании при определенных условиях роста тонкого слоя чистого кремния на поверхности силицида кобальта. Данный эффект может быть обусловлен либо диффузией атомов кобальта в направлении от поверхности в глубину образца, либо диффузией атомов кремния из подложки к поверхности [5]. Более вероятным представляется первый механизм. В любом случае формирование слоя кремния на поверхности силицида энергетически выгодно, так как свободная поверхностная энергия  $\text{Si}$  меньше таковой  $\text{CoSi}_2$ . Образование слоя чистого кремния на  $\text{CoSi}_2$  может являться полезным эффектом в случае изготовления транзистора с металлической базой, где необходимо выращивать эпитаксиальный слой кремния сверху структуры  $\text{CoSi}_2/\text{Si}$ . Установлено, что в этом случае наличие тонкого буферного слоя кремния на поверхности  $\text{CoSi}_2$  улучшает кристаллическое совершенство эпитаксиальной пленки кремния. Как видно из профилей на рис. 1, слой приповерхностного кремния образуется только при определенных условиях роста. Таким образом, имеется возможность управлять данным процессом.

Измерения поверхностного сопротивления показали, что сопротивление пленок  $\text{CoSi}_2$ , выращенных при  $T > 600^\circ\text{C}$  (образец 4), приводит к уменьшению сопротивления в три раза. Данные ОЭС свидетельствуют, что при данных условиях образуется  $\text{CoSi}_2$ , обогащенный кобальтом –  $\text{CoSi}_2\text{-C}$ . На преимущественное образование  $\text{CoSi}_2\text{-C}$  при пониженных температурах реакции указывалось также в работе [3]. Аномально низкое значение удельного сопротивления  $\text{CoSi}_2$  (образец 4) указывает на то, что электрические свойства фазы  $\text{CoSi}_2\text{-C}$  значительно отличаются от свойств  $\text{CoSi}_2$  и  $\text{CoSi}_2\text{-S}$ .

Классические диаграммы состояния системы  $\text{Co-Si}$  рассмотрены в справочнике Хансена [6]. Диаграмма структурного состояния тонкопленочных систем  $\text{CoSi}_2/\text{Si}(100)$ , сформированных методами МЛЭ, ТФЭ и РЭ, приведены на рис. 2 и 3.

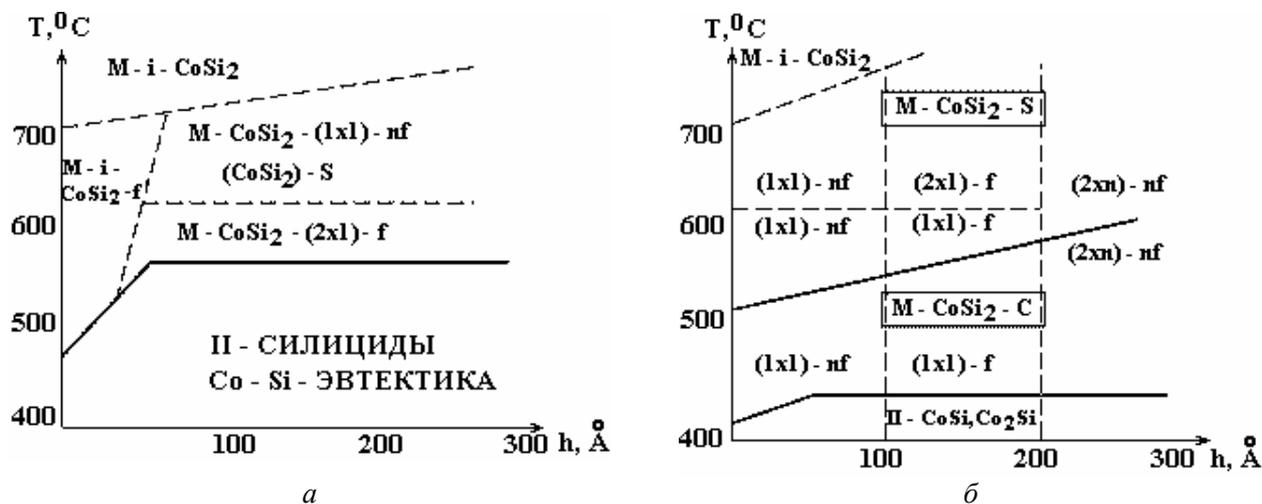


Рис. 2. Диаграммы структурного состояния МЛЭ (а) и ТФЭ (б)  $\text{CoSi}_2/\text{Si}(100)$

Идентификация структуры производилась по данным ДБЭ. Согласно этим диаграммам, интерметаллические соединения  $\text{CoSi}_2$ ,  $\text{CoSi}$  образуются при температурах выше  $1000^\circ\text{C}$ . В то же время эпитаксиальный рост пленок  $\text{CoSi}_2/\text{Si}$  происходит при сравнительно низких температурах:  $T_s = 400\text{--}600^\circ\text{C}$ .

Расхождение результатов по эпитаксии  $\text{CoSi}_2/\text{Si}$  с классическими фазовыми диаграммами объясняется следующими причинами: 1) малая толщина пленок  $\text{Co}$  и  $\text{CoSi}_2$  при эпитаксии; 2) особо чистые условия роста; формирование чистой поверхности  $\text{Si}$ , СВВ-процессы; отсутствуют промежуточные слои на реагирующих поверхностях, что уменьшает энергию активации процесса силицидообразования; 3) монокристаллический характер кремниевой подложки.

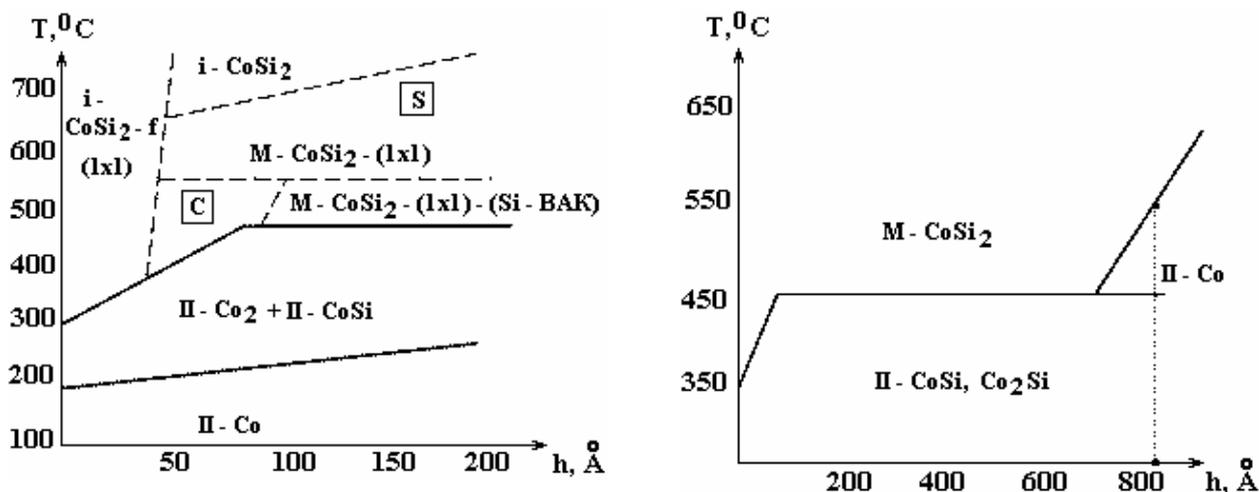


Рис. 3. Диаграммы структурного состояния РЭ-пленки  $\text{CoSi}_2/\text{Si}$  (100)

Результаты проведенных исследований указывают на сильную зависимость морфологических и электрофизических свойств структуры  $\text{CoSi}_2/\text{Si}$  от условий роста. Понимание закономерностей формирования силицида кобальта позволяет оптимизировать технологические процессы изготовления конкретных приборных структур.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Tung R.t., Schreg F.* Epitaxial  $\text{CoSi}_2/\text{Si}$  (111) interfaces // *Appl. Surf. Sci.* 1989. V. 41/42. P. 223–229.
2. *Эгамбердиев Б.Э.* Электронно-спектроскопические исследования физических свойств эпитаксиальных комбинаций и ионно-имплантированных слоев в кремнии. Автореф. док. физ.-мат. наук. Ташкент, 2003.
3. *Handerbache L. et al.* Identification of three distinct  $\text{CoSi}_2$  (111) (1x1) surface structure // *Appl. Surf. Sci.* 1989. V. 41/42. P. 257–261.
4. *Tung R.T. et al.* Control of a natural permeable  $\text{CoSi}_2$ , base transistor // *Appl. Phys. Let.*, 1986. 48. N 10. P. 635–637.
5. *d'Heurle F.M., Thomas O.* Comment on Evidence for Si diffusion through epitaxial  $\text{NiSi}_2$  grown an Si (111) // *Appl. Phys. Let.* 1989. 52. N 26. P. 2269–2272.
6. *Хансен М., Андерко К.* Структуры двойных сплавов. М.: Metallurgizdat, 1962.

Поступила 29.07.06

#### Summary

The presented results of the study of the processes of the shaping superthin film  $\text{CoSi}_2$  on surfaces Si (100) by methods MLE, TFE and RE. The Explored regularities of the initial stage of the growing of the film  $\text{CoSi}_2$ . It is offered stekhiometry of film  $\text{CoSi}_2$  by method Oje – electronic spectroscopy. The results of investigation point to strong dependency morphological and electro-physical properties of structures  $\text{CoSi}_2/\text{Si}$  (100) from conditions of the growing. The measurements of the surface resistance factors that resistance film  $\text{CoSi}_2$  grown under  $T > 6000\text{c}$ , little are changed for miscellaneous mode growing.