

Белорусский государственный университет
Факультет радиофизики и электроники
Кафедра физической электроники

Низкотемпературное формирование слоёв силицидов платины для силовых диодов Шоттки

Цель: исследовать процесс формирования силицидов платины при низкотемпературном отжиге.

Задачи:

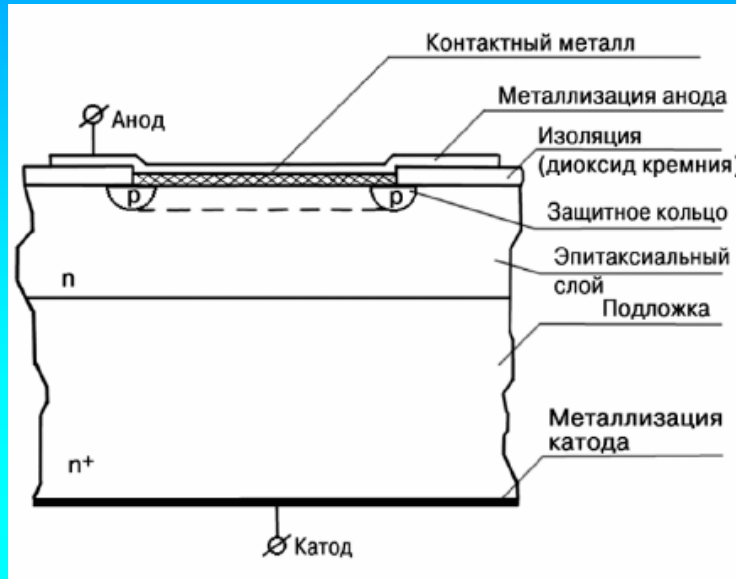
- исследовать особенности формирования силицидов платины в диапазоне температур от 140-500 °С при различных длительностях отжига;
- с помощью РОР определить фазовый состав и концентрационные профили полученных образцов;
- с помощью ЭД определить структурный состав формируемых структур;
- исследовать особенности электрических характеристик силицидов платины, сформированных при низких температурах.

Магистрант РФиЭ **Конопляник И.В.**

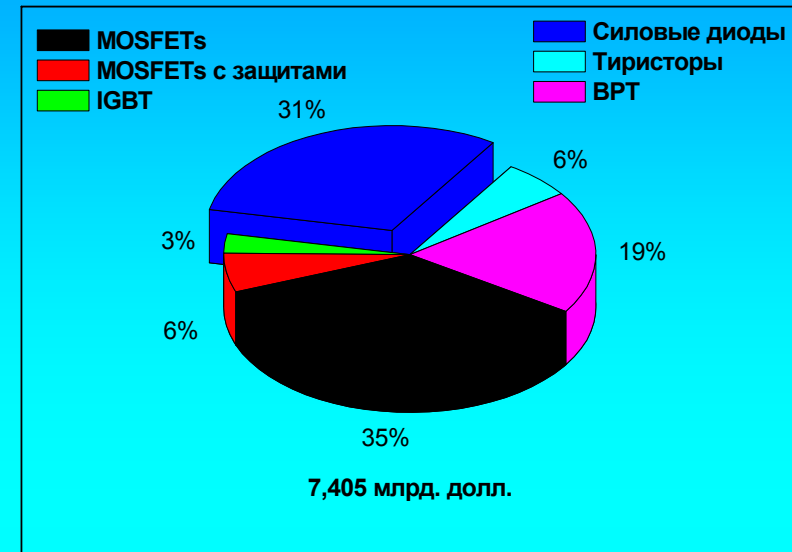
Руководитель: д. ф.-м. наук, профессор **Комаров Ф.Ф.**

Области применения силицидов.

Силовые диоды Шоттки.



Ячейка кристалла силового диода Шоттки.



Структура мирового рынка силовых приборов (2004г.)

Значения высот барьера Шоттки для различных силицидов на кремнии n -типа

Силицид	PtSi	Pt ₂ Si	NiSi	Ni ₂ Si	VSi ₂
$\varphi_B, \text{эВ}$	0,87	0,78	0,68	0,68	0,7±0,04

Области применения силицидов.

Общие электрические характеристики диодов Шоттки.

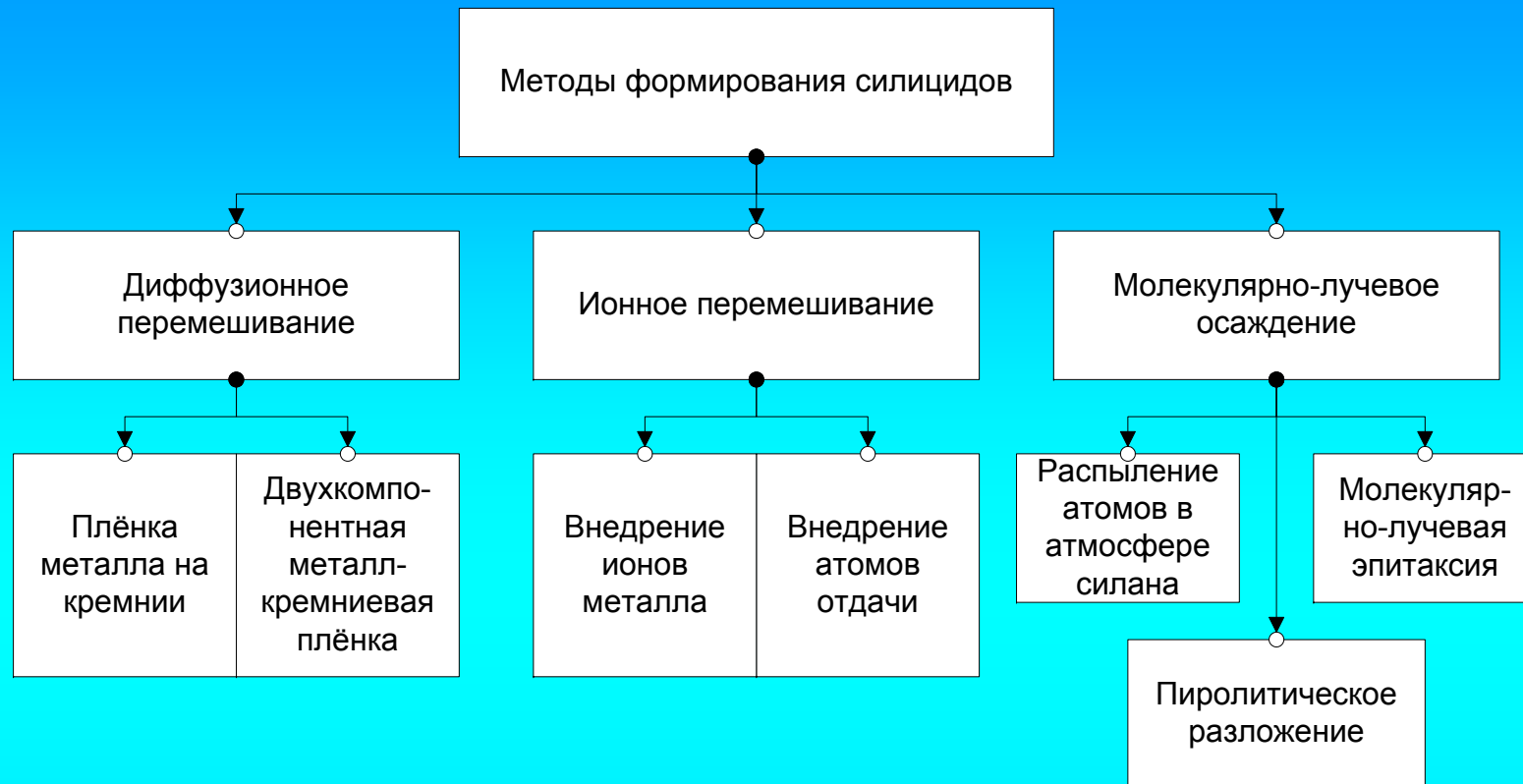
Фирма-изготовитель	Технологический процесс		Максимальная высота барьера, мВ	Максимальная плотность обратного тока, мА/мм ²	Максимальное прямое падение напряжения, мВ
	Максимально допустимое обратное напряжение, В	Максимально допустимая температура перехода, °С			
International Rectifiers	20	150	655...665	26...52	290
	30		665...675	14	320
	45		675...685	10	370
	60		700...710	7	450
	45	175	760...780	2,2	440
	100		810...830	0,95	550
	175		840...880	1,5	640
ST Microelectronics	25...30	150	680...690	18...35	320...350
	40...45		720...740	16...28	370...410
	60		715...720	13...32	500
	45	175	785	2,7...6	450...520
	100		860...890	0,55...0,9	580...610

Области применения силицидов.

Тепловизорные приборы.

Страна, фирма	Тип матрицы	Рабочая область спектра, мкм	Формат (число пикселей)	Размер пикселя, мкм	Рабочая температура °К	Температурная чувствительность (NETD), м°К
Германия, AEG Infrared-Module GmbH	PtSi	3 ... 5	256x256	24x24	75	75
США, Hughes	PtSi	3 ... 5	256x256	30x30	40	
США, Boeing Comp.	PtSi	1 ... 5	324x240	30x30	75	60
			486x640	24x24		70
РФ, ЗАО "Матричные технологии"	PtSi	3 ... 5	128x128	27x27	80	30
			256x256	25x25		
			512x512	14x14		

Методы формирования силицидов.

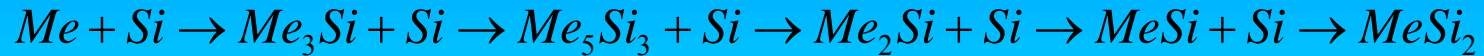


Факторы, управляющие процессом зарождения фазы силицида:

- чистота границы раздела металл-кремний;
- химическая чистота материалов плѐнки и подложки;
- диффузионная способность атомов металла по отношению к кремнию или наоборот;
- температура взаимодействия.

Методы формирования силицидов.

Плѐнка металла на кремнии



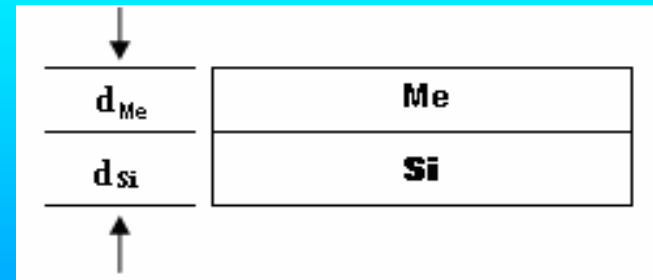
Между временем образования силицидов и температурой реакции существует экспоненциальная зависимость:

$$\frac{1}{\tau} = Ke^{-\frac{Q}{RT}}$$

где τ – время образования силицида; K – постоянная; Q – энергия активации; T – температура реакции.

Важно, что состав формируемых фаз силицида во многом определяется соотношением толщин исходной плѐнки металла и кремния.

- $d_{Me} < d_{Si}$
 Pt_2Si и $PtSi$; Ni_2Si , Ni_5Si_2 и Ni_3Si
- $d_{Me} > d_{Si}$
 Pt_2Si и Pt_3Si ; Ni_2Si , $NiSi$ и $NiSi_2$



Традиционная технология получения силицидов платины

1. Предварительная очистка и нанесение металлической плёнки.

Проблемы:

- сильная зависимость скорости формирования от наличия плёнки оксида;
- сильная зависимость параметров силицидов от чистоты границы раздела металл – полупроводник.

2. Высокотемпературный отжиг.

Проблемы:

- нежелательные диффузионные процессы;
- механические и термические напряжения.

3. Очистка сформированных структур от непрореагировавшего металла.

Проблемы:

- химическая стойкость металлов к травителям;
- подтравливание сформированных структур.

Резерфордское обратное рассеяние (POP/RBS).

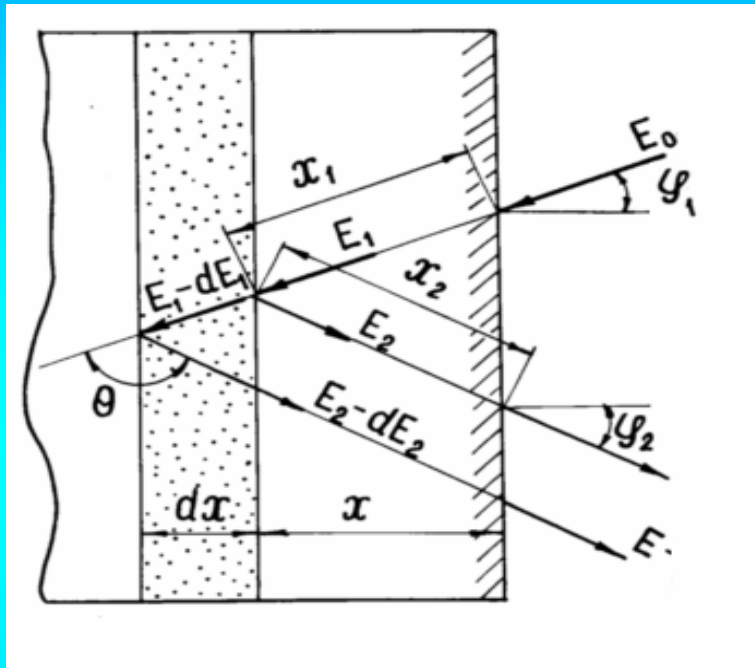
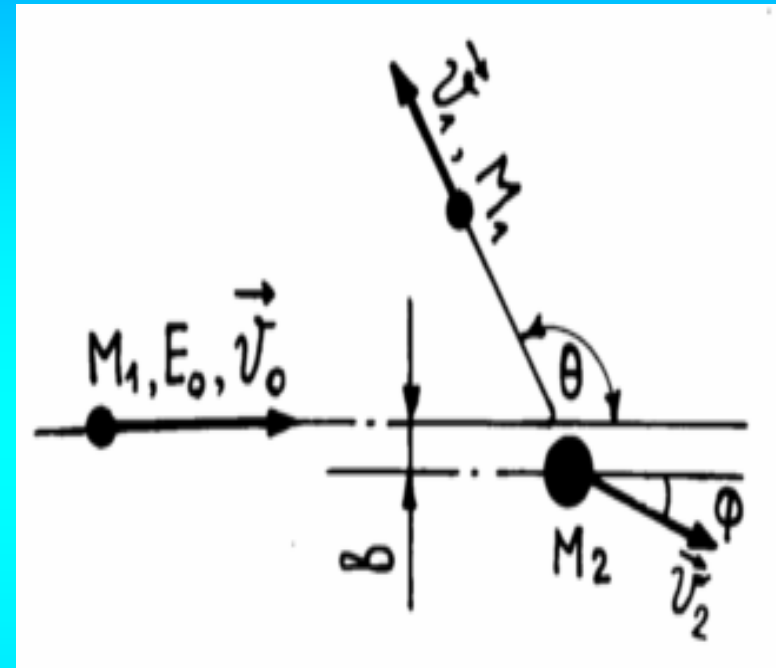


Схема обратного рассеяния ионов в образце.



Упругое соударение иона с изолированным атомом.

Резерфордовское обратное рассеяние (POP/RBS).

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{2E \sin^2 \theta} \right)^2 \cdot \frac{\left(\cos \theta + \left[1 - (M_1 / M_2 \sin \theta)^2 \right]^{1/2} \right)^2}{\left[1 - (M_1 / M_2 \sin \theta)^2 \right]^{1/2}}$$

Формула Резерфорда (дифференциальное сечение)

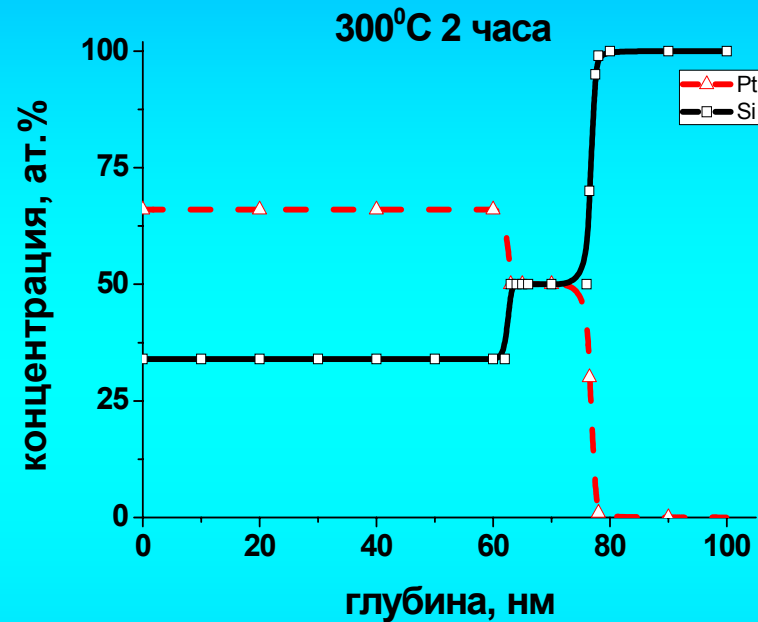
Выход обратнорассеянных ионов:

$$Y = \sigma(\theta, E) D N t d\Omega$$

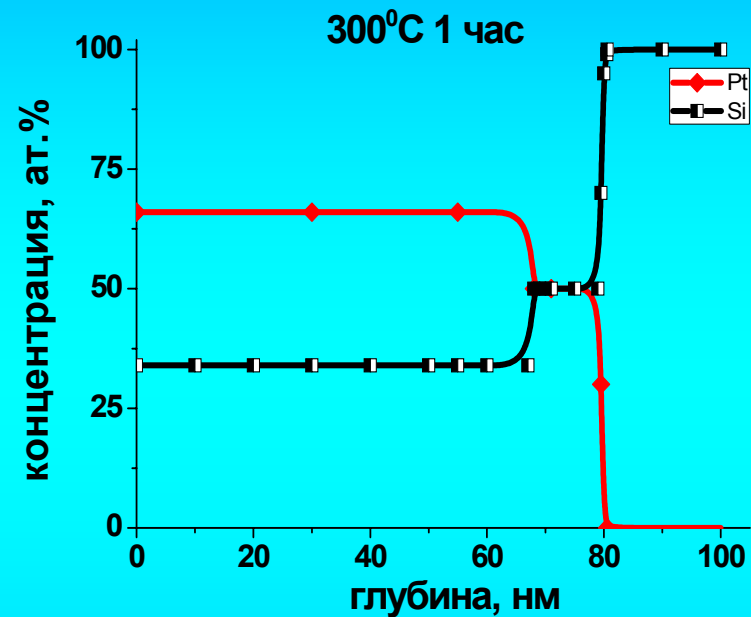
где D – полное число ионов, падающих на образец; Nt – слоевая концентрация атомов; $\sigma = \int_{\Omega} (d\sigma / d\Omega) d\Omega$.

POР анализ образцов состава Pt/Si после термообработок.

Отжиг при 300°С 1 и 2 часа отжига.



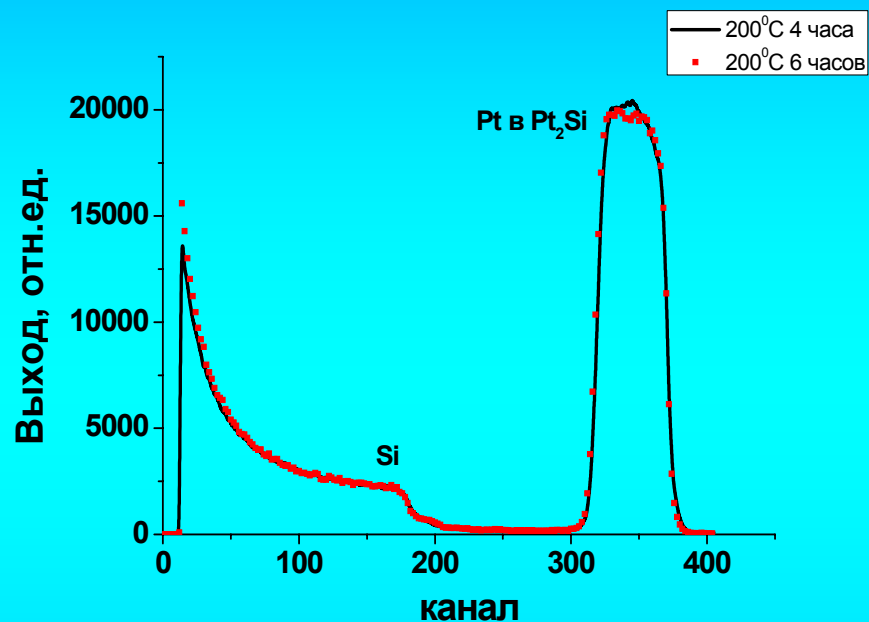
Концентрационные профили образца, отожжённого в течение 2 часов при температуре 300°С.



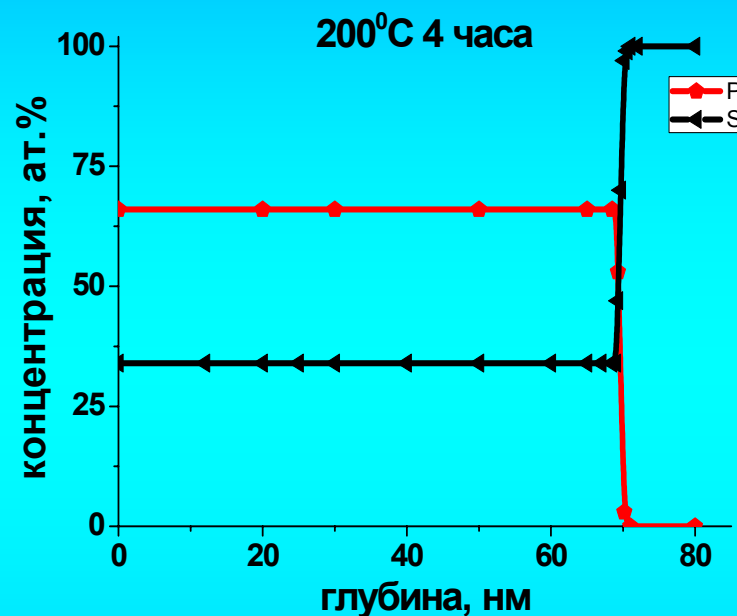
Концентрационные профили образца, отожжённого в течение 1 часа при температуре 300°С.

POР анализ образцов состава Pt/Si после термообработок.

Отжиг при 200°C 4 и 6 часов.



POР спектры от образцов, отожжённых в течение 4 и 6 часов при температуре 200°C.



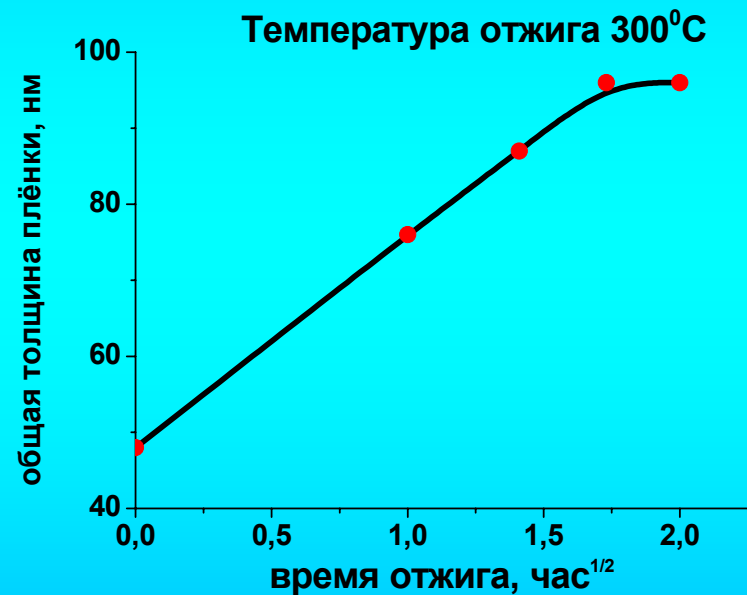
Концентрационные профили образцов, отожжённых в течение 4 и 6 часов при температуре 200°C.

POР анализ образцов состава Pt/Si после термообработок.

Согласно литературным источникам:

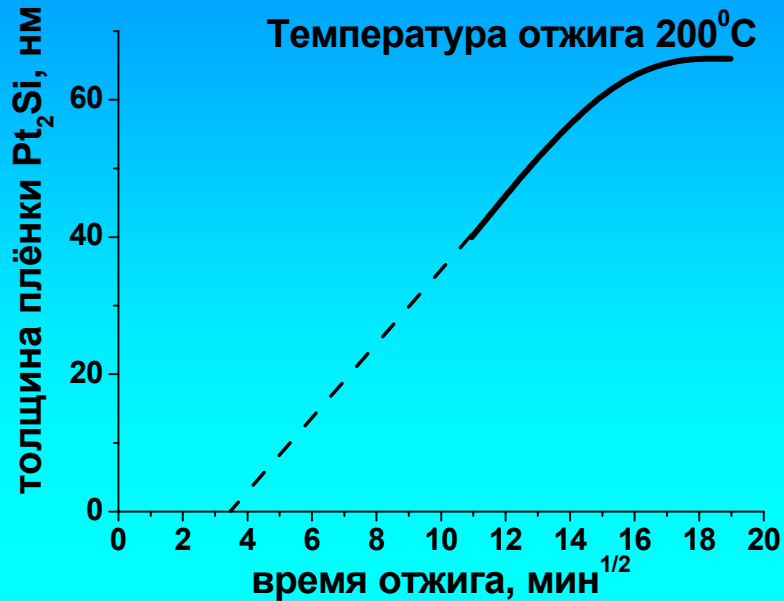
$$X^2 = Dt$$

где X – толщина формируемого слоя, D – коэффициент диффузии, t – время отжига.



Зависимость толщины плёнки от времени отжига.

РОР анализ образцов состава Pt/Si после термообработок.



Толщина плёнки Pt₂Si в зависимости от времени отжига.

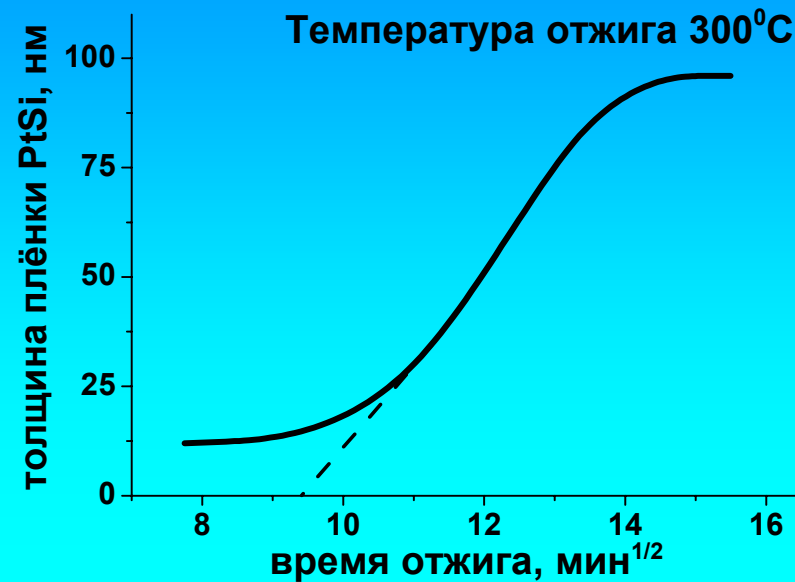
Рассчитано:

$$D_{\text{PtSi}} = 443,2 \text{ нм}^2/\text{мин};$$

$$D_{\text{Pt}_2\text{Si}} = 28,6 \text{ нм}^2/\text{мин};$$

$$E_{\text{PtSi}} = 1,37 \text{ эВ};$$

$$E_{\text{Pt}_2\text{Si}} = 1,25 \text{ эВ}.$$



Толщина плёнки PtSi в зависимости от времени отжига.

Литературные данные:

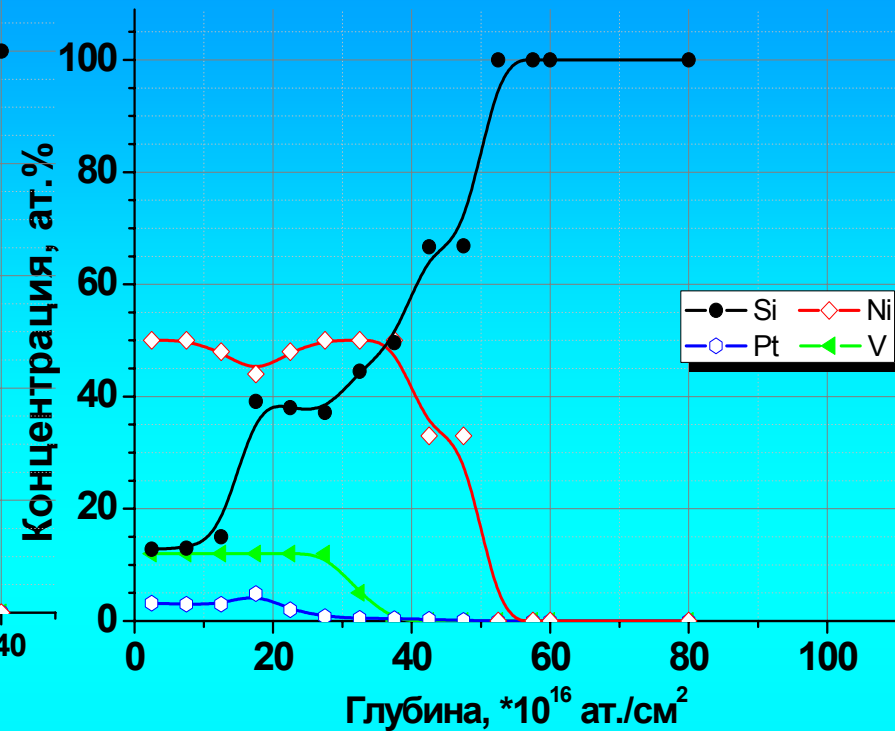
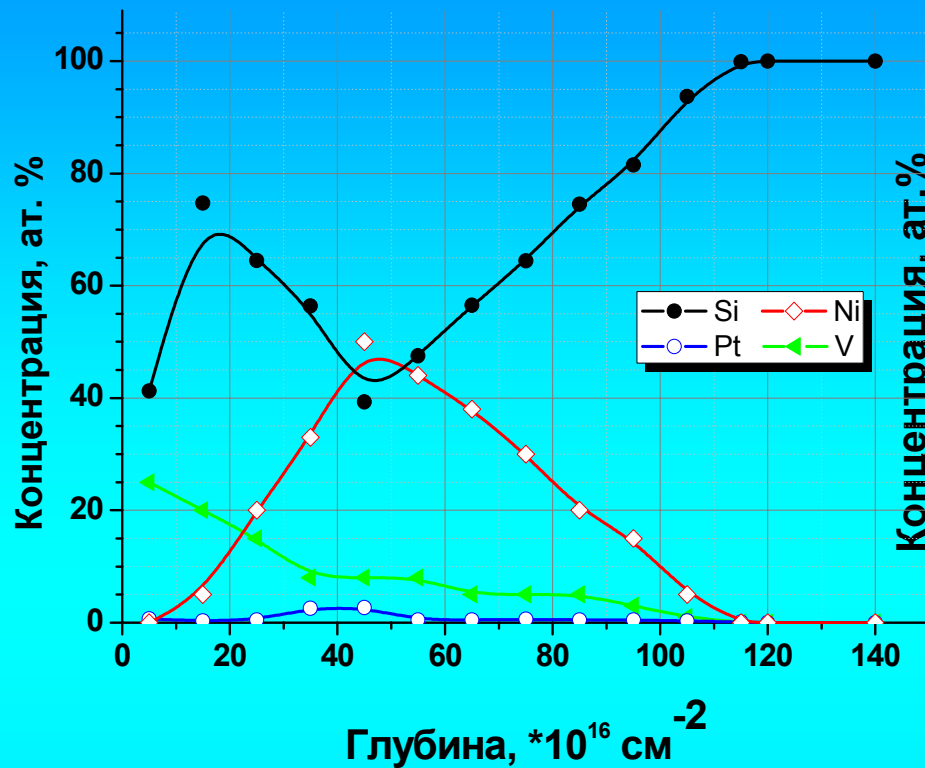
$$D_{\text{PtSi}} = 420 \text{ нм}^2/\text{мин};$$

$$D_{\text{Pt}_2\text{Si}} = 32 \text{ нм}^2/\text{мин};$$

$$E_{\text{PtSi}} = 1,5 \pm 0,2 \text{ эВ};$$

$$E_{\text{Pt}_2\text{Si}} = 1,3 \pm 0,2 \text{ эВ}.$$

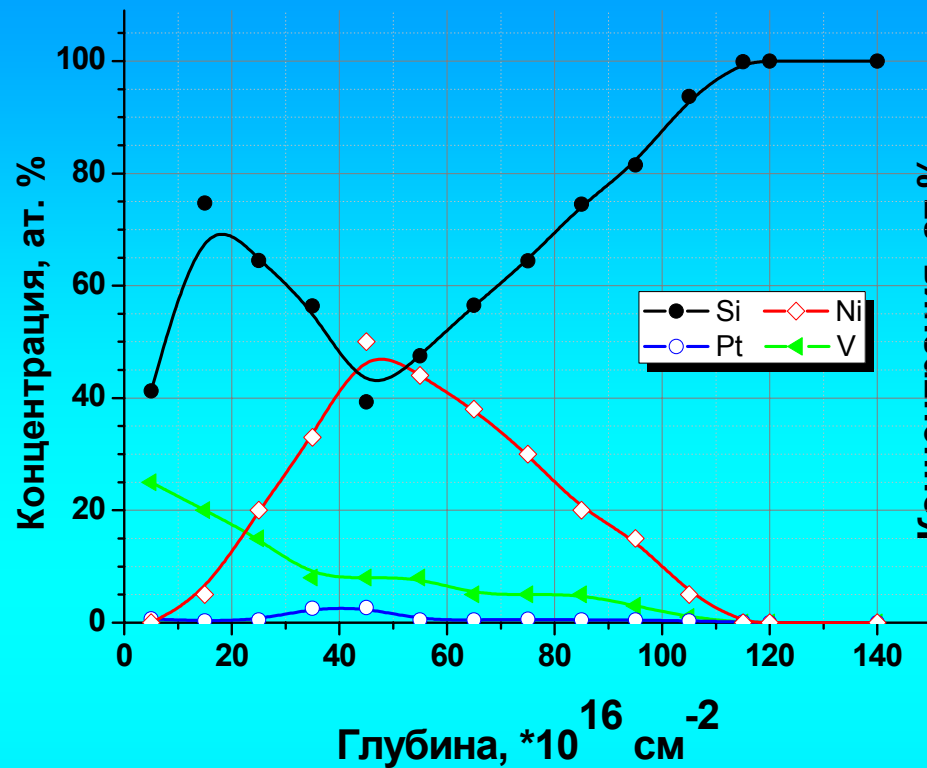
РОР анализ многокомпонентных образцов.



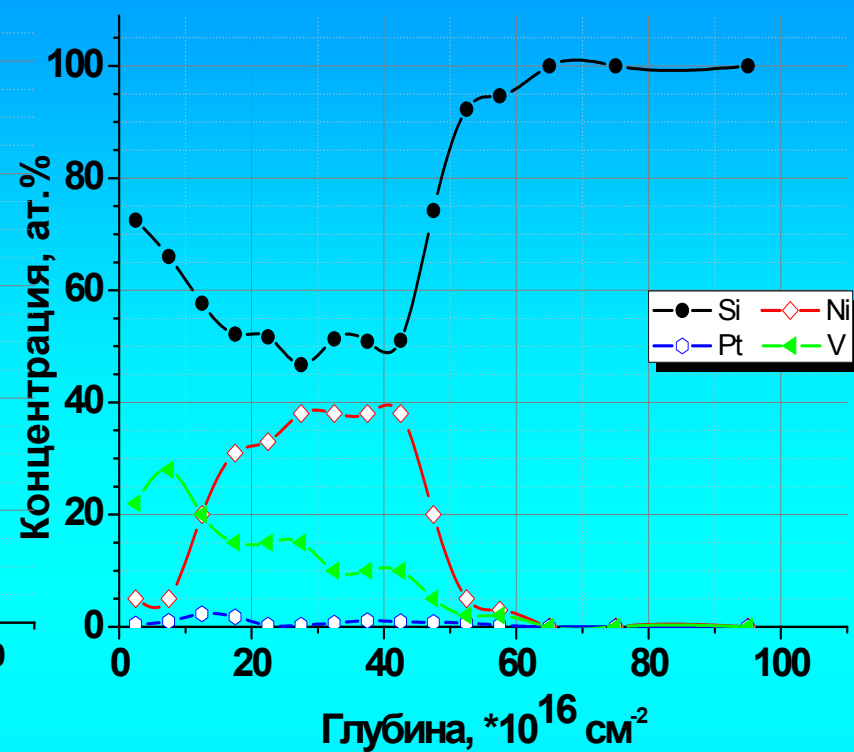
Концентрационные профили от
исходного образца толщиной 250Å
(Ni, Pt, V)

Концентрационные профили от
образца с составной плёнкой
толщиной 250Å (Ni, Pt, V),
отожжённого при 300°C (60 мин).

РОР анализ многокомпонентных образцов.

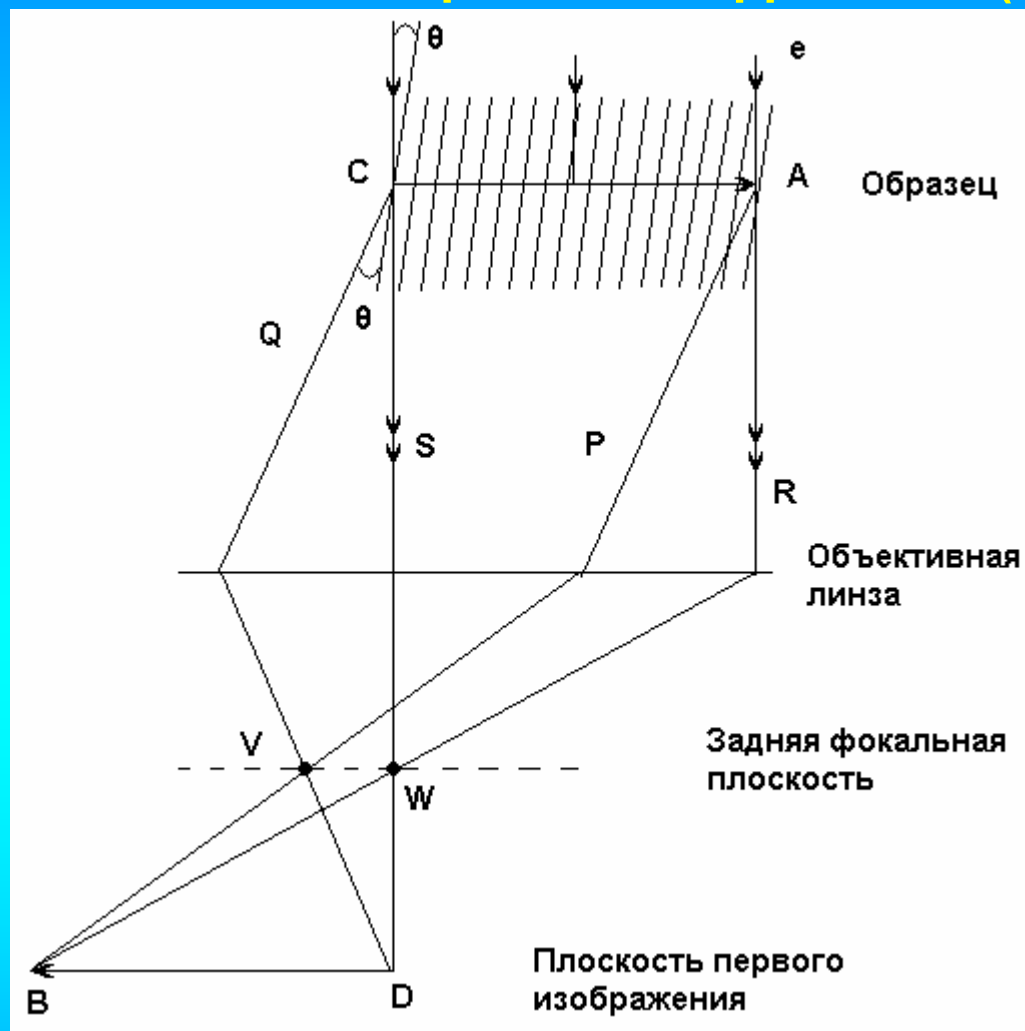


Концентрационные профили от
исходного образца толщиной 250 Å
(Ni, Pt, V)

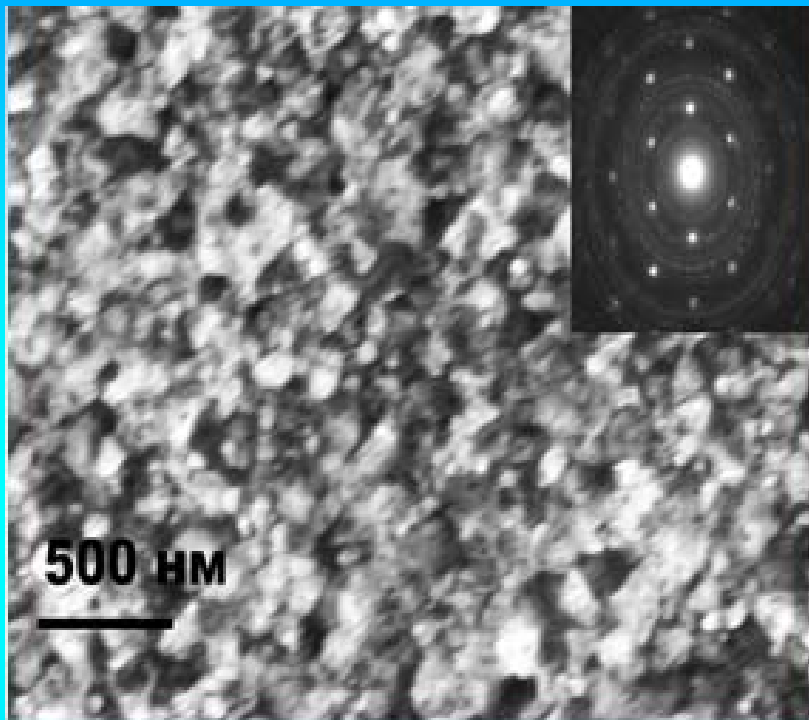


Концентрационные профили от
образца с составной плёнкой
толщиной 250 Å (Ni, Pt, V),
отожжённого при 300°C (60 мин) и
при 550°C (30 мин).

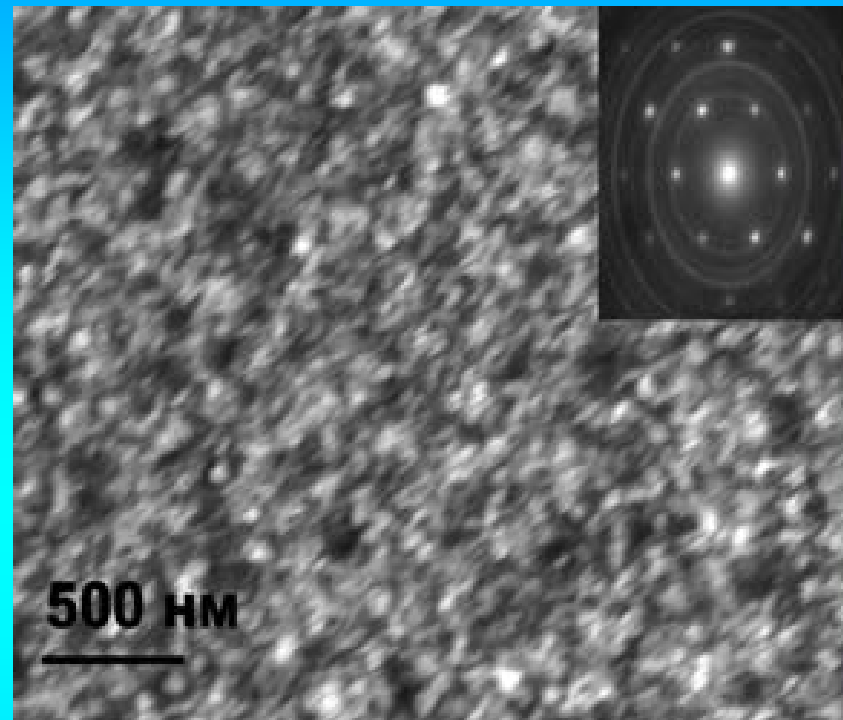
Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) в сочетании с электронной дифракцией (ЭД).



Схематическое изображение хода дифрагированных и недифрагированных электронных лучей в объективной линзе, задней фокальной плоскости и плоскости первого изображения. 16



ПЭМ-микрофотография
структуры после отжига в
течение 30 минут при 500°C.



ПЭМ-микрофотография
структуры после отжига в
течение 2 часов при 300°C.

Метод Ван-дер-Пау.

Отличительной особенностью метода Ван-дер-Пау является то, что измерения можно проводить образцов любой геометрической формы.

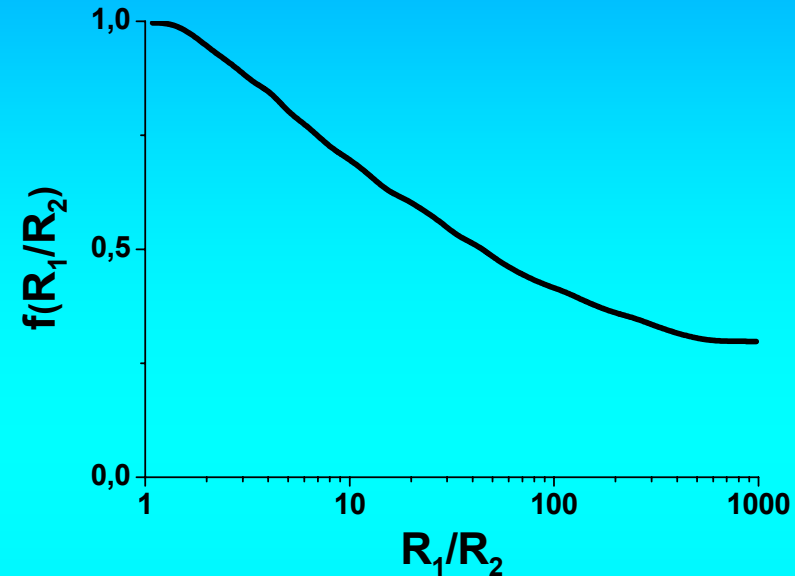
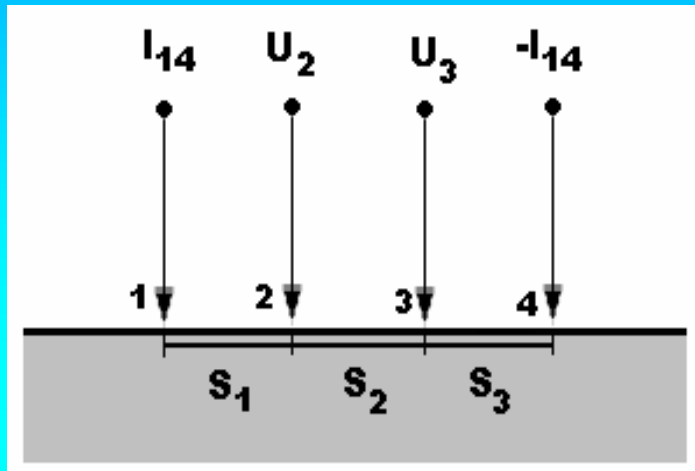


Схема расстановки зондов.

График поправочной функции.

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{R_1 + R_2}{2} f(R_1 / R_2)$$

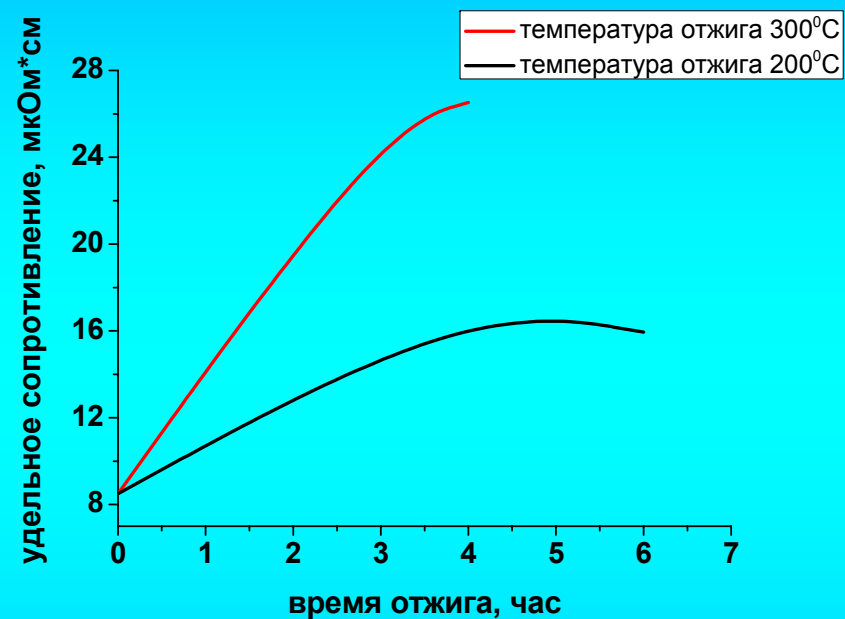
При симметричном расположении зондов $R_1=R_2=R$, а $f(R_1/R_2)=1$.

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} R = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{U}{I}$$

Слоевое/удельное сопротивление образцов.

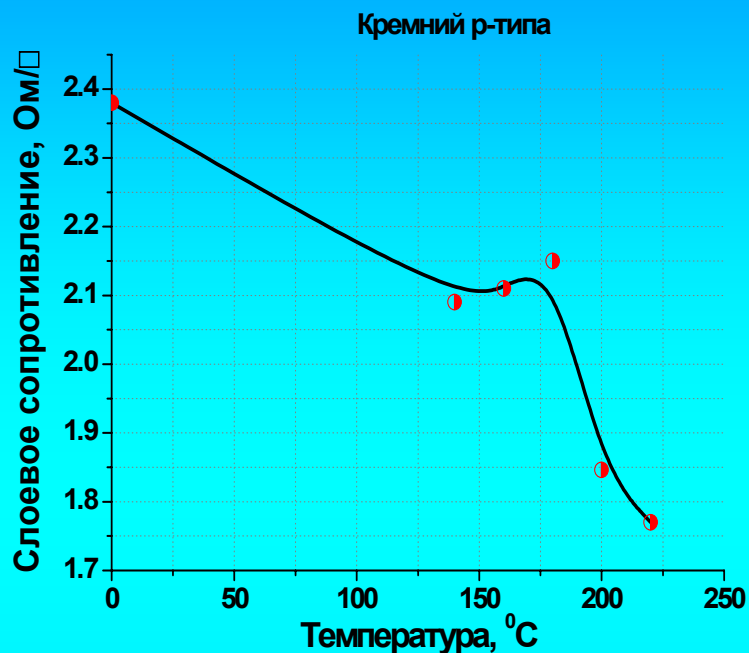
Значения слоевого сопротивления силицидов в зависимости от режимов формирования.

Тип кремния	Отжиг		Rs, Ом/□
	T, °C	t, час	
p	140	4	2,09
P	160	4	2,11
p	180	4	2,15
n	200	2	2,769
p	200	2	1,9763
n	200	4	2,5482
p	200	4	1,846
n	200	6	2,3443
p	200	6	1,897
n	300	1	2,2849
p	300	1	1,914
n	300	3	2,6416
p	300	3	1,9819
n	300	4	2,7634
p	300	4	2,2481

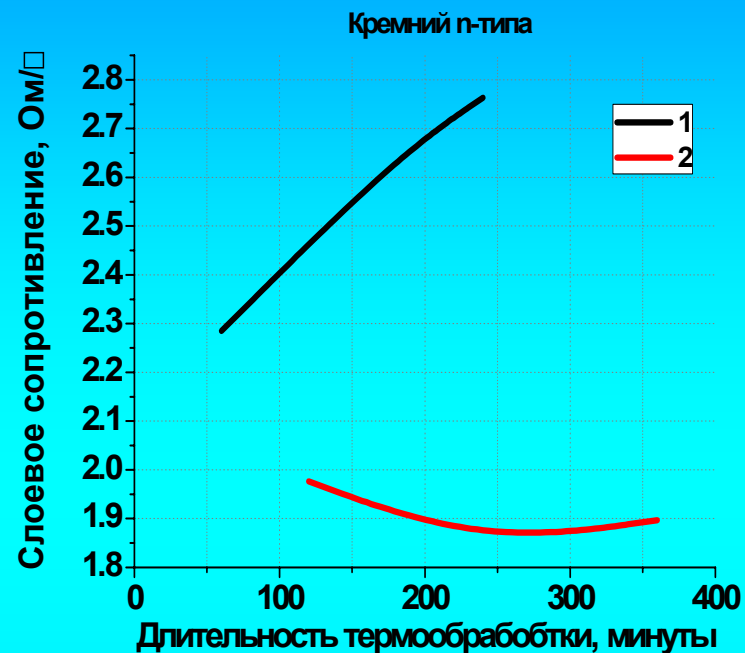


Удельное сопротивление образцов в зависимости от времени отжига.

Слоевое/удельное сопротивление образцов.



Зависимость величины слоёвого сопротивления от температуры отжига при 4 часовой длительности термообработки



Зависимости слоёвого сопротивления структур от длительности термообработки:
1 – 300°C; 2 - 200°C.

Выводы.

Установлено:

- на механизм формирования силицидов платины не влияет тип проводимости кремниевой подложки;
- при температуре 300⁰С зарегистрировано формирование фазы Pt₂Si с дальнейшим переходом в фазу PtSi при увеличении длительности термообработки;
- фазовый состав силицида, сформированного при 200⁰С отжиге, ограничивается фазой Pt₂Si без дальнейшего перехода к фазе PtSi при увеличении длительности термообработки;
- процесс силицидообразования протекает по квадратичному закону;
- величины энергий активации составляют 1,25 эВ и 1,37 эВ для Pt₂Si и PtSi соответственно;
- величины коэффициентов диффузии составляют 28,6 нм²/мин и 443,2 нм²/мин для Pt₂Si и PtSi соответственно;
- величина удельного сопротивления силицидов сформированных на кремнии различного типа проводимости отличается (для кремния n-типа удельное сопротивление больше).