

# Электрофизические методы измерений

# **Методы измерения удельного сопротивления**

# Метод Ван-дер-Пау

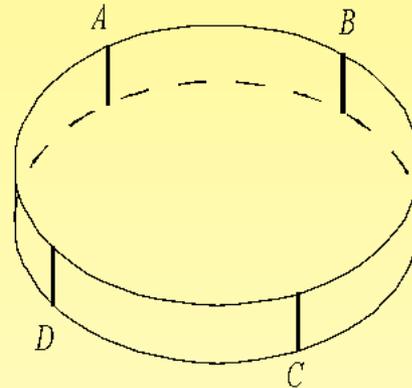
Метод Ван-дер-Пау используется для определения  $\rho$  плоских тонких образцов произвольной формы. На границе плоского образца толщиной  $d$  создают четыре контакта  $A, B, C, D$ , расстояние между которыми примерно равно  $s$ . Измеряют два сопротивления

$$R_{ABCD} = \frac{V_{CD}}{I_{AB}} \text{ и } R_{BCDA} = \frac{V_{DA}}{I_{BC}}.$$

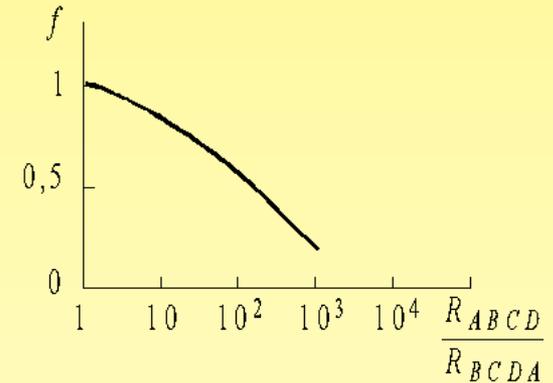
Если  $d \ll s$ , то справедливо соотношение

$$\frac{\rho}{d} = R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \left( \frac{R_{ABCD} + R_{BCDA}}{2} \right) \cdot f \left( \frac{R_{ABCD}}{R_{BCDA}} \right).$$

Функция  $f$  протабулирована, график представлен на рис.б. При расчете  $f$  контакты считаются точечными.



а

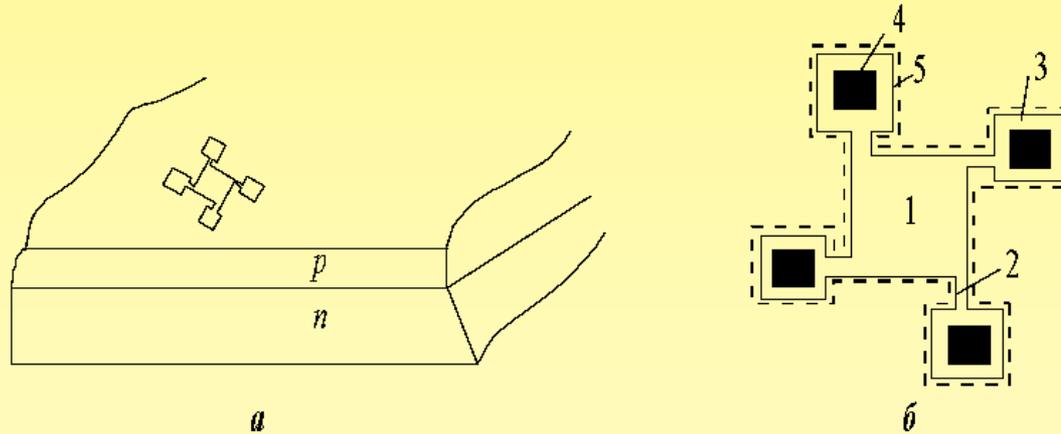


б

Расположение контактов (а) и функция поправок  $f$  (б) при измерении удельного сопротивления методом Ван-дер-Пау

# Метод Ван-дер-Пау

Для определения  $\rho$  слоя на полупроводниковой пластине изготавливают резисторы Ван-дер-Пау.



Резистор Ван-дер-Пау: *a* - расположение на пластине; *b* - структура (1 - тело резистора; 2 - плечи резистора; 3 -  $p^+$ -области; 4 - металлизация; 5 - стоп-канал)

Сопротивление обратно смещенного  $p$ - $n$ -перехода должно быть много больше  $R_s$  слоя. Сопротивление плеч резистора должно быть малым по сравнению с сопротивлением тела резистора. Для резисторов, изготовленных по планарной технологии, отношение  $\frac{R_{ABCD}}{R_{BCDA}} = 1$  с

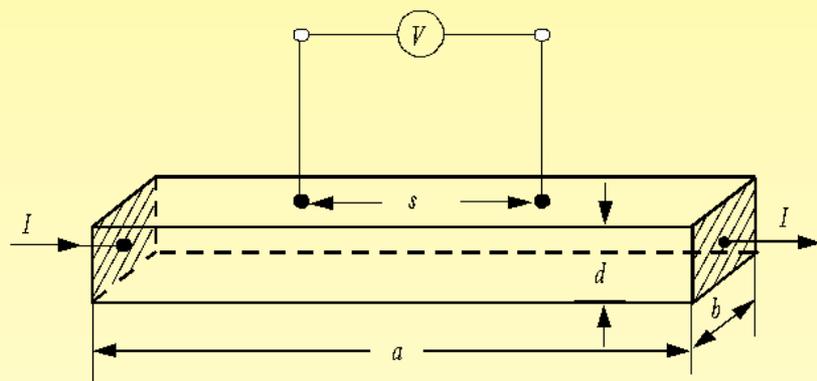
точностью не хуже 10% и  $f=1$  с точностью до 0.1%. При этом  $\rho = 4.532 \frac{V}{I} d$ .

Размеры резистора могут меняться в широких пределах (от десятка микрометров до миллиметра), что можно использовать для контроля микронеоднородностей.

# Двухзондовый метод

Для измерения удельного сопротивления объемных образцов правильной геометрической формы используют простейший двухзондовый метод. Ток  $I$  пропускают через торцевые омические контакты, напряжение  $V$  измеряют с помощью металлических зондов, расположенных на расстоянии  $s$  друг от друга. В этом случае удельное сопротивление равно

$$\rho = \frac{Vbd}{Is}.$$

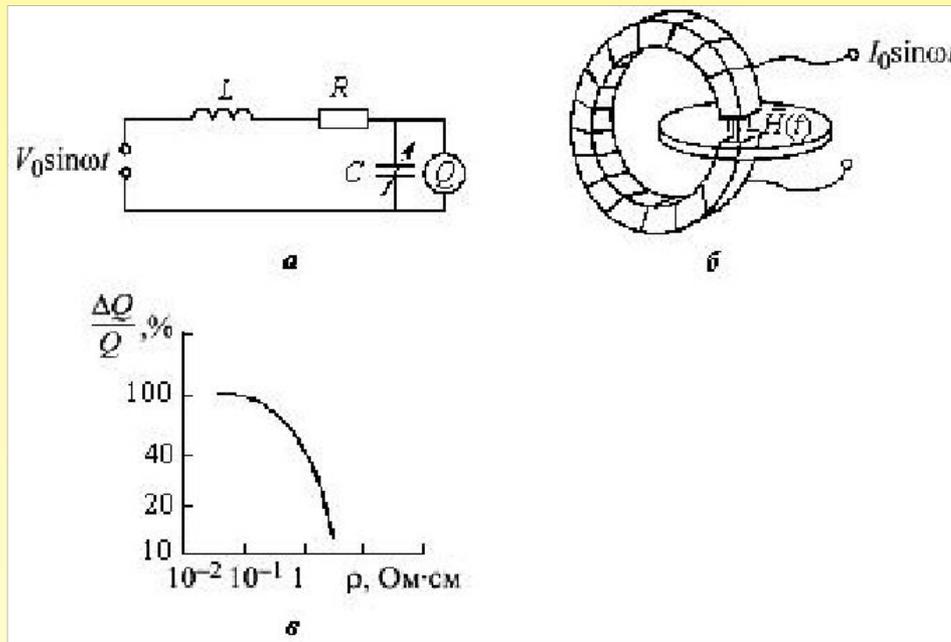


Расположение контактов в двухзондовом методе необходимо проводить на тонких длинных образцах и располагать зонды не слишком близко к торцам, чтобы удовлетворить условия

$$b, d \ll a, \quad 3b < s < \frac{a}{5}.$$

# Бесконтактный метод

Бесконтактный метод определения  $\rho$  основан на явлении взаимодействия переменного электромагнитного поля со свободными носителями в полупроводнике. Пластины помещают в разрез катушки индуктивности  $L$ . Высокочастотное электромагнитное поле вызывает в образце вихревые токи. Катушку индуктивности включают в колебательный контур, содержащий конденсатор  $C$  и сопротивление  $R$ , обусловленное потерями электромагнитной энергии в проводах и образце.

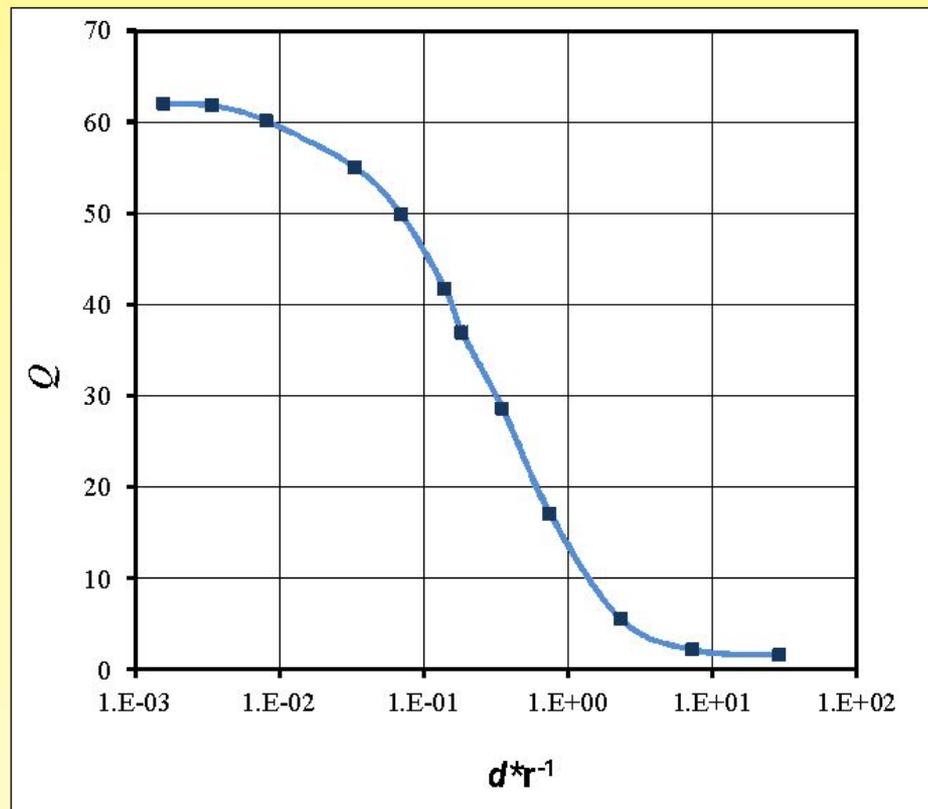


Бесконтактный метод измерения удельного сопротивления.  $a$  – схема  $Q$  – метра,  $b$  – распределение магнитное поле  $H$  в образце, зависимость изменения добротности от удельного сопротивления образца

Контур с помощью конденсатора настраивают в резонанс. При введении образца в катушку добротность контура  $Q$  падает, причем изменение добротности  $\Delta Q$  тем больше, чем меньше удельное сопротивление  $\rho$ .

Этот метод эффективен при исследовании относительно низкоомных образцов.

# Бесконтактный метод



Калибровочная зависимость, построенная по результатам измерений комплекта рабочих эталонов

Диапазон определяемого этим методом  $\rho$ : от 0.01 до 5 Ом·см.

Удельное сопротивление рабочих эталонов, необходимых для калибровки установки, определяют четырехзондовым методом.

Для конкретного датчика разность  $Q^{-1} - Q_0^{-1}$  пропорциональна произведению  $\sigma \cdot d$ .

$$Q^{-1} - Q_0^{-1} = A \sigma d,$$

где  $A$  – коэффициент пропорциональности,  $\sigma$  – удельная электропроводность пластины,  $d$  – ее толщина.

По набору рабочих эталонов ( $\rho=0.01$  Ом·см – 5 Ом·см) можно построить калибровочную кривую для конкретного датчика  $Q=f(\sigma \cdot d)$ .

# Бесконтактный метод

Чувствительность метода ограничена погрешностью определения изменения добротности  $\Delta Q$  при больших  $\rho$  и величины  $Q$  при малых  $\rho$ . Измерения проводят при частотах  $f=500$  кГц – 20 МГц. Погрешность метода составляет 10 – 20%.

Потери в образце вследствие вихревых токов увеличиваются с ростом частоты  $\omega$  пропорционально  $\omega^2$ . На больших частотах проявляется скин-эффект. Глубина проникновения высокочастотного электромагнитного поля в полупроводник

$$l_s = \sqrt{\frac{2}{\sigma\omega\mu_0}},$$

где  $\mu$  и  $\mu_0$  - магнитные проницаемости материала и вакуума.

Влияние скин-эффекта начинает сказываться при  $\rho \leq 1 \cdot 10^{-2}$  Ом·см на частотах  $f > 10$  МГц, а при  $\rho \approx 5$  Ом·см на частотах  $f > 3$  ГГц.

На высоких частотах существенно влияние паразитной емкости между витками катушки и паразитных сопротивлений в измерительной цепи, что приводит к увеличению погрешности при определении  $\rho$ .

# Метод сопротивления растекания

Метод сопротивления растекания точечного микрозонда (spreading resistans) уникален по диапазону измеряемого удельного сопротивления. Если металлический зонд (рис.14 (a)) имеет с поверхностью полупроводника омический контакт малой площади радиуса  $r_0$ , то сопротивление растекания этого контакта  $R_p$  однозначно связано с удельным сопротивлением полупроводника  $\rho$ .

Для полубесконечного образца и контакта в форме плоского диска с радиусом  $r_0$

$$R_p = \frac{V}{I} = \frac{\rho}{4r_0}$$

Для полусферического контакта с радиусом  $r_0$  сопротивление растекания составляет

$$R_p = \frac{V}{I} = \frac{\rho}{2\pi r_0}$$

Измеряя падение напряжения на таком контакте  $V$  при пропускании через него тока  $I$ , можно определить удельное сопротивление образца:

$\rho = 4r_0 \frac{V}{I}$  - в первом случае, или  $\rho = 2\pi r_0 \frac{V}{I}$  - во втором случае.



# Метод сопротивления растекания

На практике для измерения сопротивления растекания и последующего определения удельного сопротивления полупроводника используют двухзондовую и трехзондовую схемы измерения.

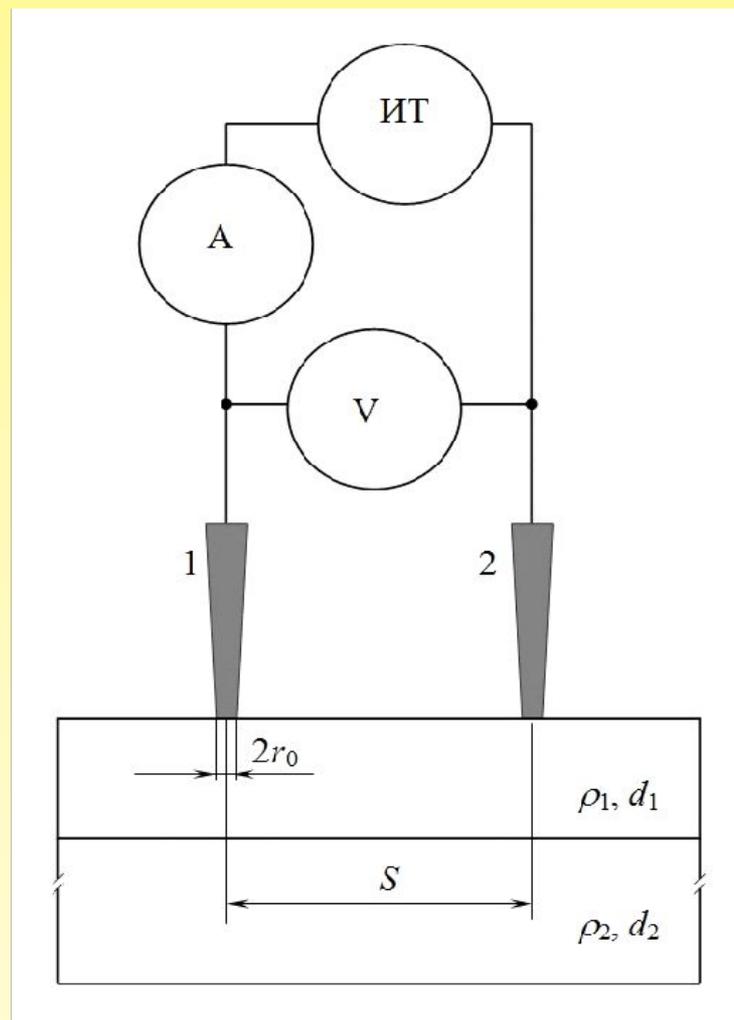
Если расстояние между зондами  $S$  значительно превышает радиус контакта  $r_0$ , то выражения для расчета сопротивления растекания будут следующими.

$$R_p = \frac{U_{12}}{2I_{12}}$$

- для двухзондовой схемы измерения, и

$$R_p = \frac{U_{12}}{2I_{23}}$$

- для трехзондовой схемы измерения.



Измерение удельного сопротивления полупроводникового слоя методом сопротивления растекания, двухзондовая схема.

# Метод сопротивления растекания

Точные размеры и форма контакта обычно неизвестны. При определении  $R_p$  используют эмпирическую формулу

$$R_p = \alpha \frac{\rho}{4r_0}.$$

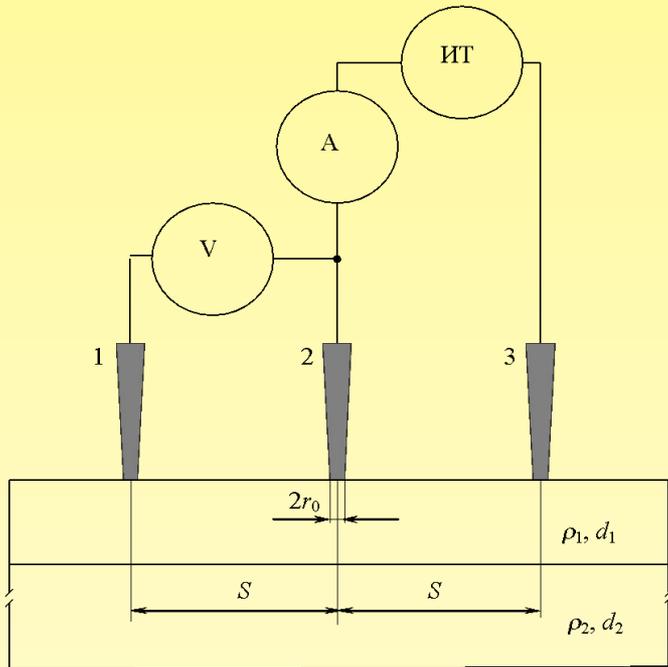
Коэффициент  $\alpha$  вычисляют при измерениях на рабочих эталонах (пластинах с известным  $\rho$ ). Этот метод является калибровочным.

Сопротивление растекания измеряют с помощью двух или трех зондов (рис.14(б)). Через два зонды 2 и 3 пропускают ток, а напряжение измеряют между зондами 1 и 2 милливольтметром с высоким входным сопротивлением. Определяют падение напряжения на сопротивлении растекания центрального зонда, падение напряжения на втором токовом зонде 3 исключается.

При измерении  $\rho$  полупроводниковых слоев надо учитывать влияние подложки на характер растекания тока. Для этого в формулу для определения  $\rho$  вводится поправочный множитель  $F$  и значение удельного сопротивления определяют по формуле

$$\rho = 4r_0 \frac{F}{\alpha} \cdot \frac{U}{I}.$$

$F$  рассчитывается теоретически.



Измерение удельного сопротивления полупроводникового слоя методом сопротивления растекания, трехзондовая схема

# Метод сопротивления растекания

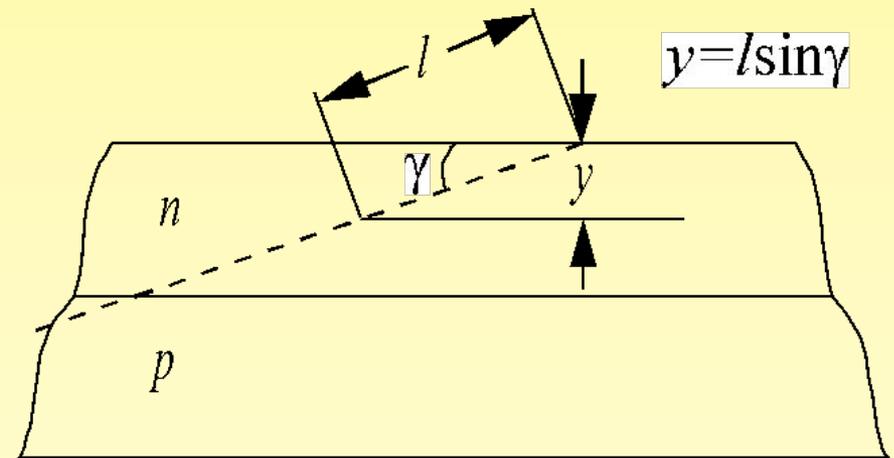
При определении  $R_p$  в тонких слоях ( $d \ll r_0$ ), справедлива формула

$$R_p = \frac{\rho d}{\pi r_0^2}.$$

При неоднородном по толщине удельном сопротивлении профиль распределения  $\rho = f(y)$  можно найти с помощью косого шлифа слоя с углом  $\gamma = (0,1 - 1)^\circ$ . Максимальное разрешение по глубине при использовании современных автоматизированных установок составляет 12.5 нм.

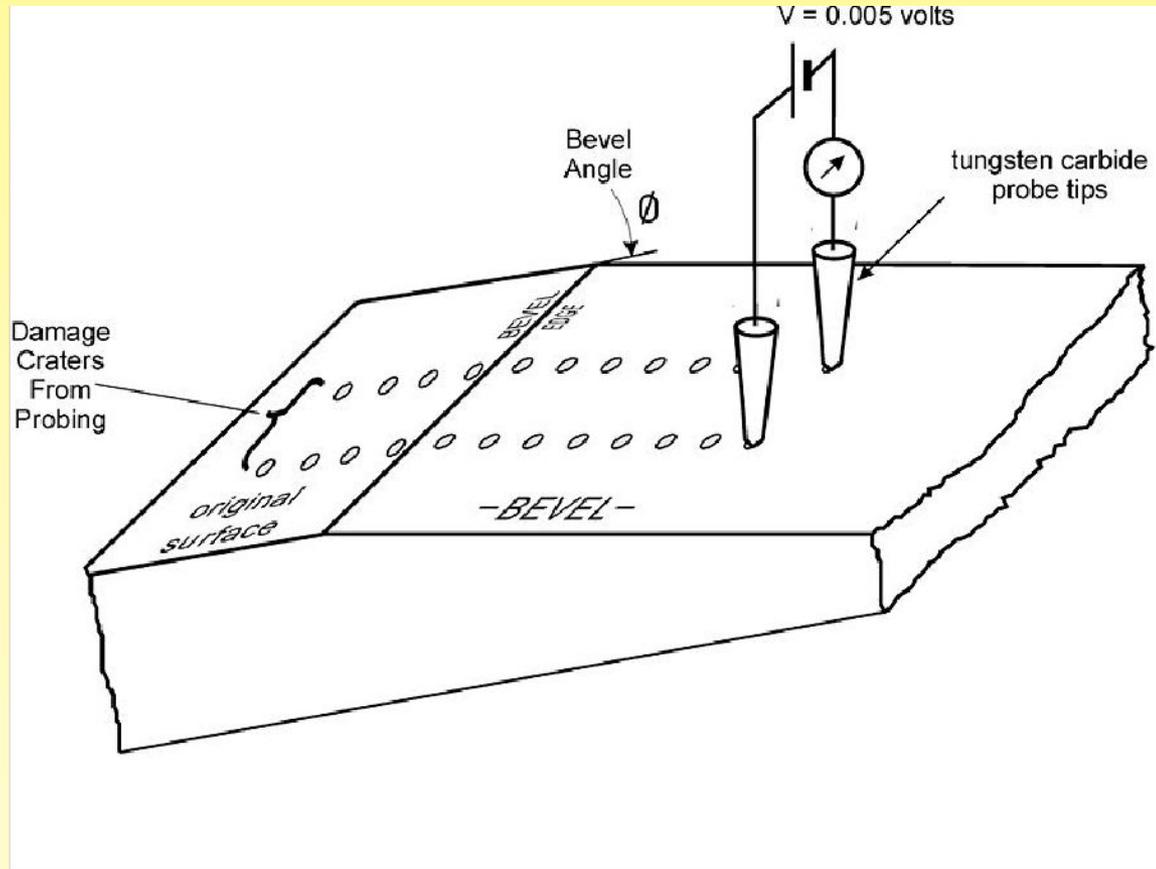
В настоящее время метод сопротивления растекания - единственный метод непосредственного контроля электрофизических характеристик Si с пространственным разрешением, не уступающим электронной микроскопии.

Локальность метода по поверхности пластины составляет десятки микрометров. Во избежание тепловых эффектов рекомендуется проводить измерения при малом токе  $I \approx (10^{-2} - 10^{-7})$  А и напряжении  $V = (3 - 20)$  мВ.



Измерение профиля распределения  $\rho$  с применением косого шлифа

# Метод сопротивления растекания



Перемещение зондов с рабочей частью из карбида вольфрама по поверхности косого шлифа (BEVEL) при измерении профиля сопротивления растекания

# Метод сопротивления растекания

## Источники погрешности.

Невоспроизводимость геометрических размеров контакта (качество обработки поверхностей зонда и полупроводника, нагрузки на зонд и механической системы зондового манипулятора).

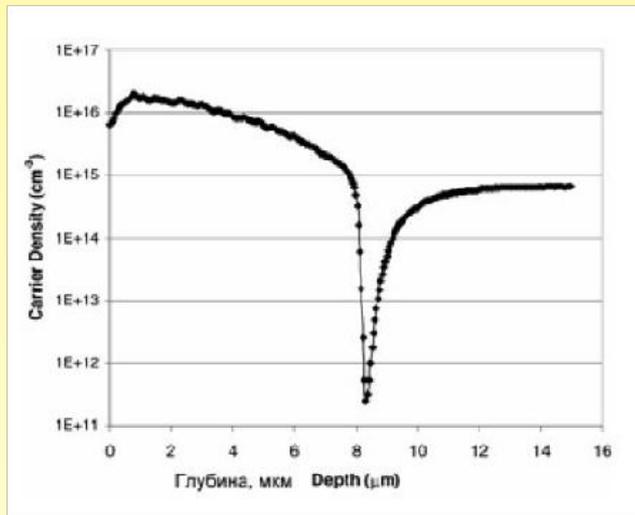
Разогрев полупроводника в области контакта.

Неомичность контакта и наличие дополнительного контактного сопротивления (окисный слой на поверхности полупроводника). Эту погрешность можно уменьшить, выбрав материал зонда и нагрузку на него. Зонд - из твердого сплава типа карбида вольфрама или осмия. При достаточном давлении острие зонда прокалывает окисный слой и создается омический контакт с образцом. Если контакт недостаточно омический, измерения проводят при малых значениях тока, равных  $1 \cdot 10^{-4}$  -  $1 \cdot 10^{-7}$  А. При этом сопротивление контакта не зависит от его величины и направления. Уменьшение величины тока также уменьшает разогрев приконтактной области. Для получения омического контакта необходимо оказывать достаточно большие усилия на зонд, которые могут достигать  $1 \cdot 10^2$  -  $1 \cdot 10^3$  Н·см<sup>2</sup>. При таких давлениях возможно механическое повреждение поверхности, что приведет к невоспроизводимости площади контактирования.

Конструкция манипулятора должна обеспечивать плавное перемещение зондов строго вертикально, без скользящего перемещения по поверхности и динамических ударов, вибрации и строго эталонировать нагрузку на зонд. Поверхность зонда должна иметь высокий класс обработки.

# Метод сопротивления растекания

Измерительный комплекс ASR-100C, (Solid State Measurements), – серийный сертифицированный прибор для прецизионного промышленного контроля, оснащенный компьютером IBM PC и программным обеспечением SRP2. Комплекс позволяет проводить измерения в шаговом режиме, с линейным разрешением до 1 мкм вдоль направления сканирования длиной до 25 мм. Применяется двухзондовая схема измерения  $R_p$ : два идентичных микрозонда перемещаются в цикле вдоль профиля сканирования. Помимо  $\rho$ , для Si и Ge может определяться профиль концентрации свободных носителей заряда ( $n$  или  $p$ ).



Профиль концентрации дырок в слое Si, (имплантация бора с дозой  $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ )

рассчитываются следующие параметры: толщина слоя; среднее  $\rho$  и  $n$  (или  $p$ ); глубина залегания электрофизических границ; ; поверхностное сопротивление, доза внедренной примеси.

Распределение  $R_p$ ,  $\rho$ ,  $n$  (или  $p$ ) может быть представлено в виде дискретной графической (или численной) функции параметра от координаты.

Для оценки качества подложек применяется сканирование по плоскости стандартной полированной пластины, обычно вдоль её диаметра.

Для профилирования многослойных приборных структур применяется технология косого шлифа с углом скоса  $\gamma = 16' - 6^\circ$  (на специальном станке). Программное обеспечение позволяет получать профили легирования структуры, содержащей до 5 слоёв, без ограничений на тип проводимости и уровень легирования, с общей толщиной структуры от 1 до 300 мкм. Для каждого слоя

# Метод сопротивления растекания

## Области применения современных установок

### Оценка оборудования.

- Эпитаксиальных реакторов.
- Установок ионной имплантации.
- Диффузионных печей.

### Обеспечение и контроль качества продукции.

#### Увеличение выхода годных.

- Глубина залегания р-п переходов.
  - Ширина переходных областей.
  - Положение пика имплантации, доза внедренной примеси, поверхностное сопротивление слоя.
  - Удельное сопротивление и концентрация носителей в слое.
  - Профили распределения удельного сопротивления и концентрации носителей в слое.
1. Пользователи проводят оценку оборудования с помощью технологии зондирования профиля распределенного сопротивления (зондирование распределенного сопротивления) после каждого изменения какого-либо параметра установки ионной имплантации, реактора или печи.
  2. Службы обеспечения и контроля качества, обеспечивающие увеличение выхода годных, контролируют глубину залегания р-п перехода, ширину перехода, дозу, поверхностное сопротивление слоя, положение и высоту пика имплантанта, удельное сопротивление и концентрацию носителей. На основании этих данных можно создавать таблицы тенденций и использовать микропрограммное управление.
  3. Измерение профиля удельного сопротивления (концентрации) может также показывать, где и почему произошел отказ того или иного прибора. Данная технология дополняет другие способы анализа.

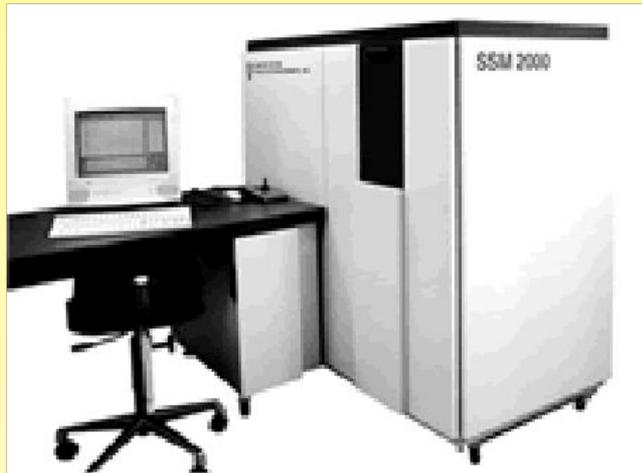
# Метод сопротивления растекания

## 8 стадий получения профилей сопротивления растекания.

- 1) Подготовка зондов (при необходимости).
- 2) Определение радиуса контакта.
- 3) Калибровка измерительной системы.
- 4) Подготовка тестируемого образца (образцов) для измерений.
- 5) Измерение профиля сопротивления растекания.
- 6) Определение удельного сопротивления по результатам калибровки.
- 7) Расчет удельного сопротивления для неоднородно легированных слоев (неоднородных профилей удельного сопротивления).
- 8) Расчет концентрации носителей в слое (профиля концентрации носителей).

# Метод сопротивления растекания

Фирма Solid State Measurements (SSM) серийно производит сертифицированные измерительные комплексы для прецизионного контроля параметров полупроводниковых слоев методом сопротивления растекания называемые профилометрами сопротивления растекания (SRP - Spreading Resistance Profilers).



Внешний вид измерительного комплекса SSM 2000 NanoSRP® System

Измерительный комплекс полностью автоматизирован - управляющий компьютер - IBM PC с прикладным программным обеспечением SRP2.

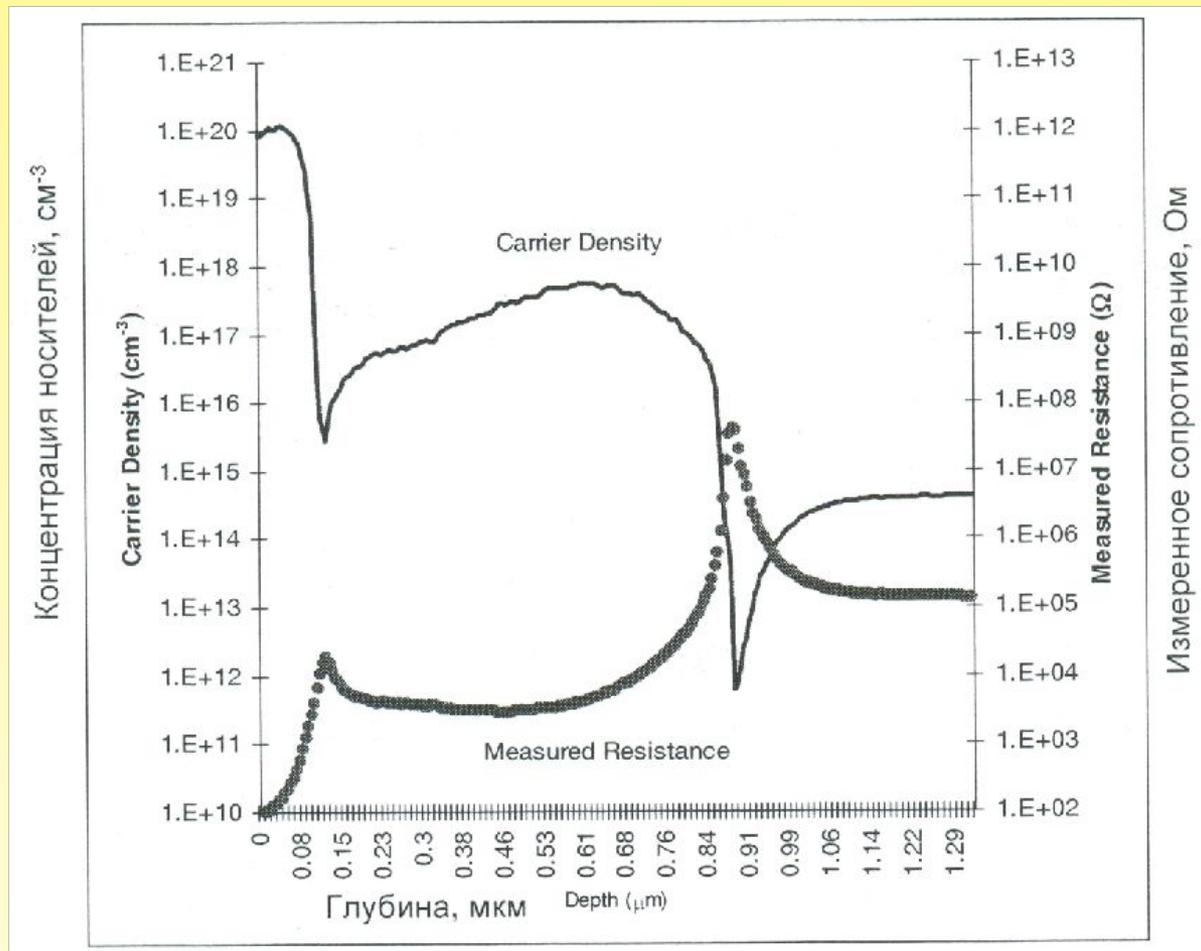
На этом комплексе можно измерять сопротивление растекания в шаговом режиме, с линейным разрешением до 1 мкм вдоль направления сканирования длиной до 25 мм. Применяется двухзондовая схема измерения  $R_p$ : два идентичных микрозонда перемещаются вдоль профиля

сканирования. Профили  $R_p(y)$  и  $\rho(y)$  для Si и Ge могут быть пересчитаны в профили концентрации свободных носителей заряда  $n(y)$  или  $p(y)$ .

Измерительный комплекс SSM 2000 NanoSRP® System позволяет проводить высокоскоростные измерения распределения удельного сопротивления и концентрации носителей заряда (электрически активной легирующей примеси) по толщине слоев кремния и германия (15 мин от окончания подготовки образца до получения профиля концентрации).

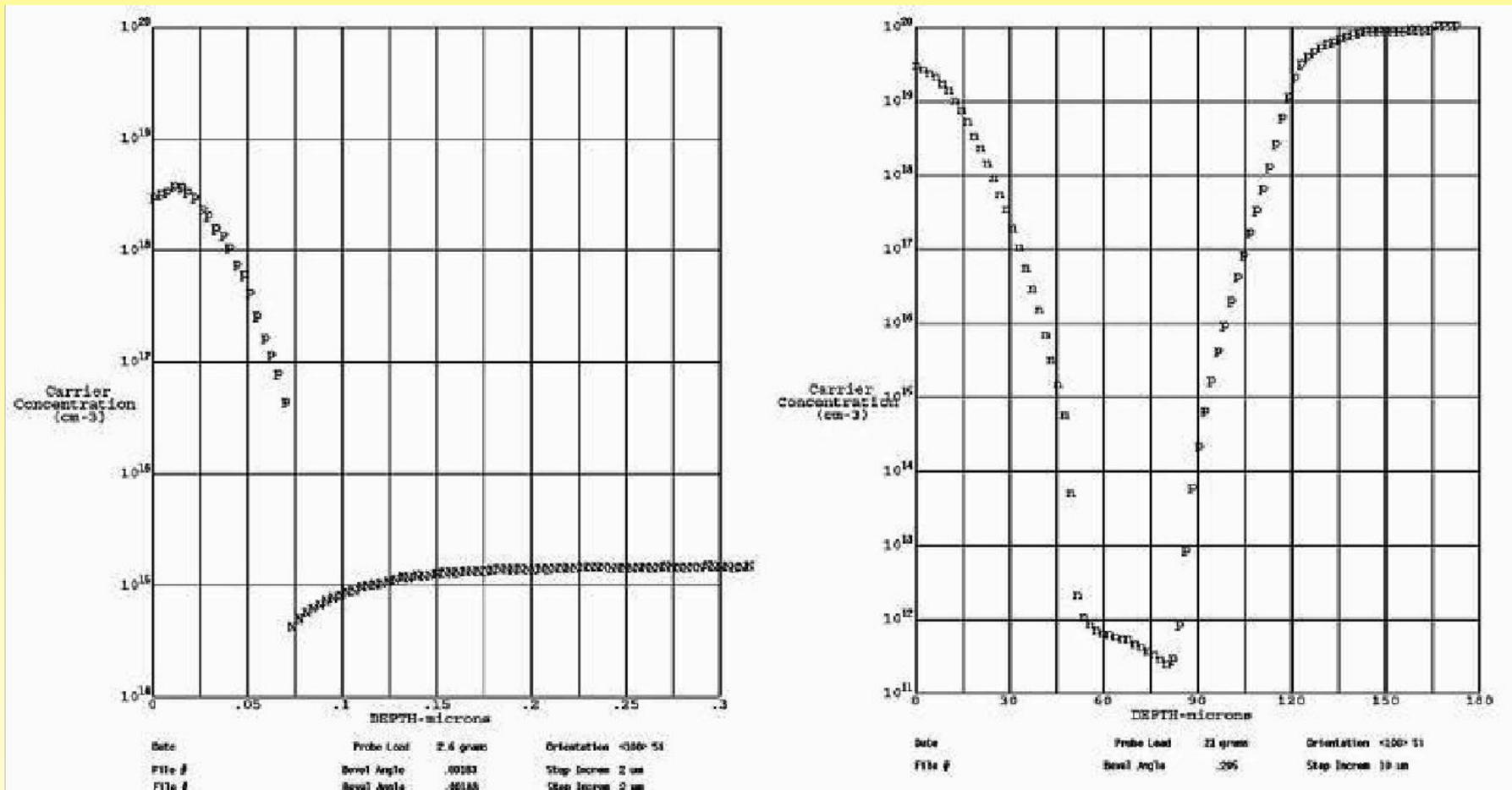
Измерительный комплекс SSM 2000 NanoSRP® System позволяет проводить высокоскоростные измерения распределения удельного сопротивления и концентрации носителей заряда (электрически активной легирующей примеси) по толщине слоев кремния и германия (15 мин от окончания подготовки образца до получения профиля концентрации).

# Метод сопротивления растекания



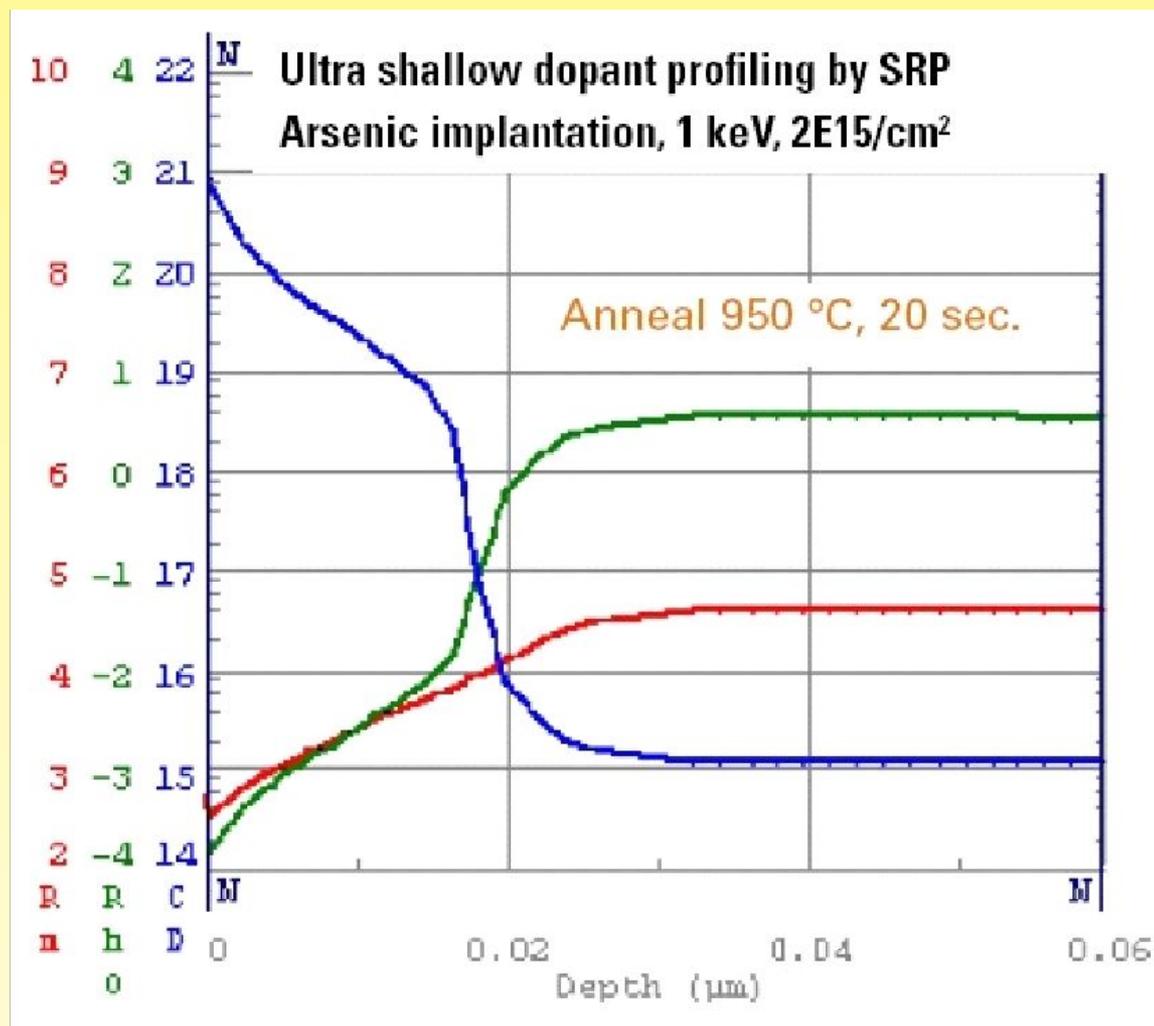
Профиль распределения удельного сопротивления (точками) и концентрации носителей (сплошная линия) в структуре  $n^{++}-p^{+}-n$  биполярного транзистора

# Метод сопротивления растекания



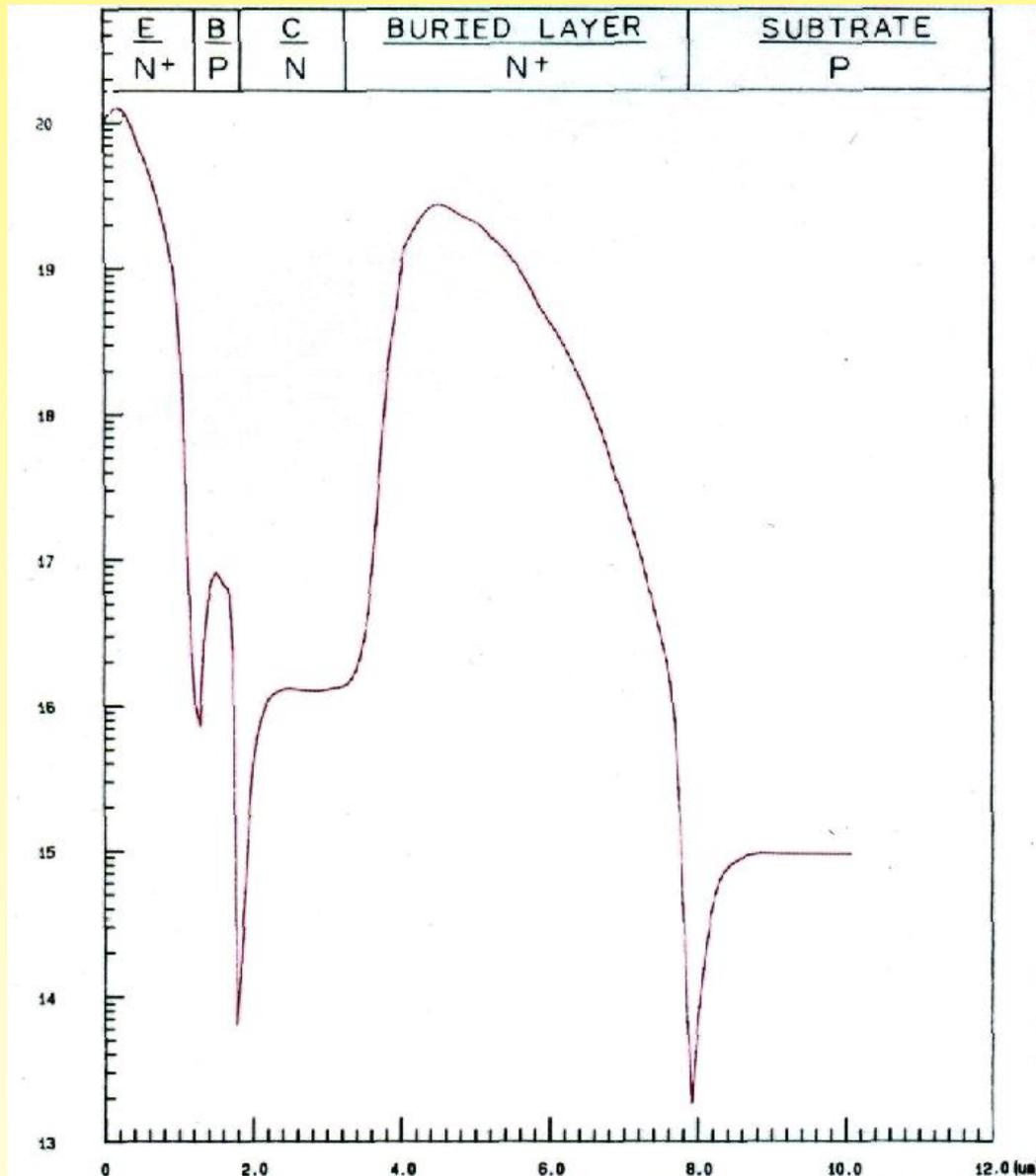
Результаты измерения профилей концентрации носителей заряда для мелкого (слева) и глубокого (справа) слоев.

# Метод сопротивления растекания



Профили сопротивления растекания (красным), удельного сопротивления (зеленым), концентрации электронов (синим) в сверхтонком слое кремния, легированном мышьяком.

# Метод сопротивления растекания



На графике слева представлен профиль концентрации носителей заряда в  $n^+p-n^+p$ -структуре биполярного транзистора, полученного с применением ионного легирования. Профиль измерен методом сопротивления растекания с высоким разрешением по глубине на измерительном комплексе SSM 2000 NanoSRP<sup>®</sup> System. Четко видны распределения концентрации электронов в эмиттере, дырок в базе, электронов в коллекторе и дырок в подложке и расположение p-n переходов.

# Основные характеристики методов измерения удельного сопротивления полупроводниковых структур

Метод	Погрешность, %	Локальность, мкм	Диапазон $\rho$ , Ом·см	Структуры
Четырехзондовый	1 – 5	10 – 50	$10^{-4} - 5 \cdot 10^3$	Слитки, пластины, $n^+n$ , $p^+p$ , $n-p$ , $p-n$ , КНД, КНС
Сопротивление растекания	1 – 10	10	$10^{-3} - 10^3$	$n-n^+$ , $p-p^+$ , $p-n$ , $n-p$ , многослойные структуры
Бесконтактный	5 – 20	1000	$10^{-2} - 5$	Пластины, $n^+n$ , $p^+p$ , КНД, КНС