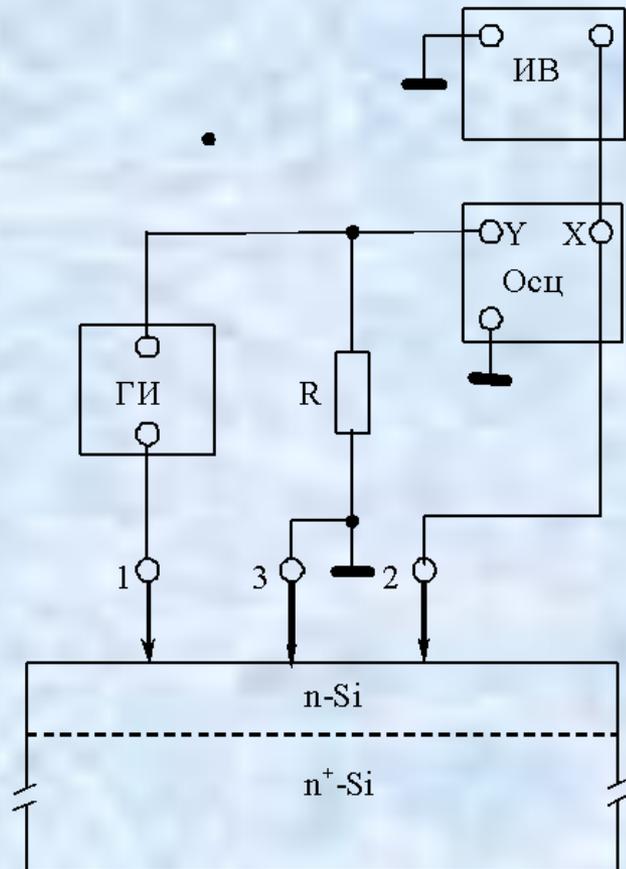


# Методы исследований

**Методы измерения  
концентрации и подвижности  
носителей заряда**

# Трехзондовый метод

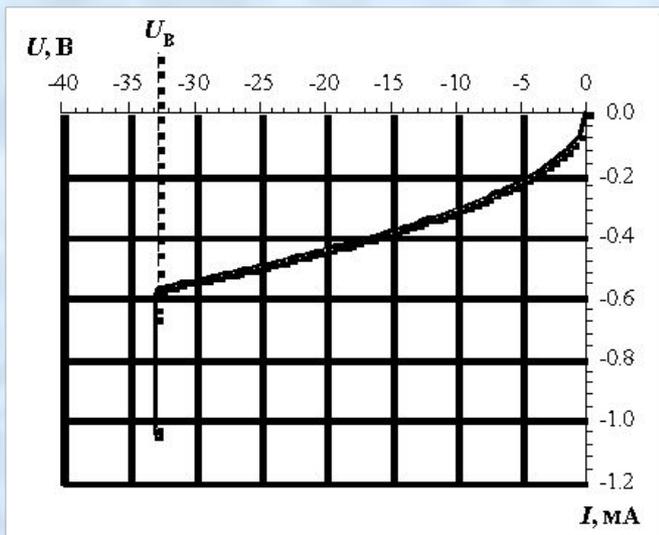


Трехзондовый метод, основан на измерении напряжения пробоя точечного контакта металл-полупроводник и ранее широко использовался для контроля концентрации легирующей примеси в эпитаксиальных  $n-n^+$  и  $p-p^+$  структурах.

На поверхность полупроводника опускают три точечных зонда. Зонды 1 и 2 образуют с полупроводником омические контакты, а зонд 3 создает потенциальный барьер. Измеряют напряжение пробоя этого контакта. Между зондами 1 и 3 прикладывают пульсирующее напряжение с полярностью, соответствующей обратному смещению контактного барьера 3. Контакт между зондом 1 и полупроводником не строго омический, и на нем может падать напряжения за счет протекающего тока. В результате точность измерения пробивного напряжения снижается. Измерение напряжения на контакте между зондом 3

и полупроводником осуществляют с помощью зонда 2, используя осциллограф и импульсный вольтметр с большим входным сопротивлением. Тока в цепи контактов 2 и 3 и падения напряжения на контакте 2 нет.

# Трехзондовый метод



Определение пробивного напряжения точечного контакта

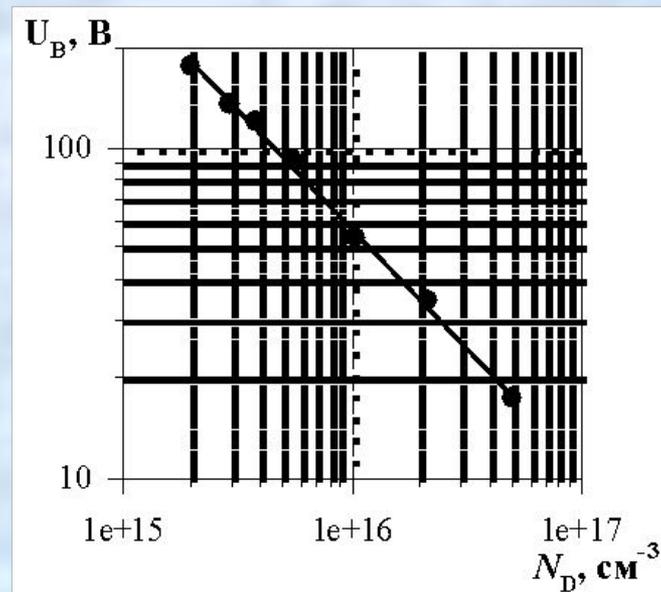
Кривая имеет вид степенной функции

$$U_B = A\rho^B.$$

Параметры  $A$  и  $B$  калибровочной кривой и погрешность трехзондового метода зависят от ряда факторов. Вольт-амперная характеристика точечного контакта должна позволять точно фиксировать момент пробоя, что, в первую очередь, определяет точность измерения напряжения пробоя. Достигается это соответствующим выбором материала зондов, формой контакта нагрузкой на него.

Напряжение пробоя точечного контакта зависит от многих внешних факторов, поэтому аналитической формулы для расчета удельного сопротивления по измеренному значению пробивного напряжения не существует. Трехзондовый метод — калибровочный. Калибровка — по рабочим эталонам с известным  $\rho$ . По результатам измерения эталонов трехзондовым методом строится градуировочная кривая  $U_B = f(\rho)$  или  $U_B = f(N)$ .

Диапазон измеряемых удельных сопротивлений — от 0.1 до 4 Ом·см. В указанном диапазоне калибровочная кривая

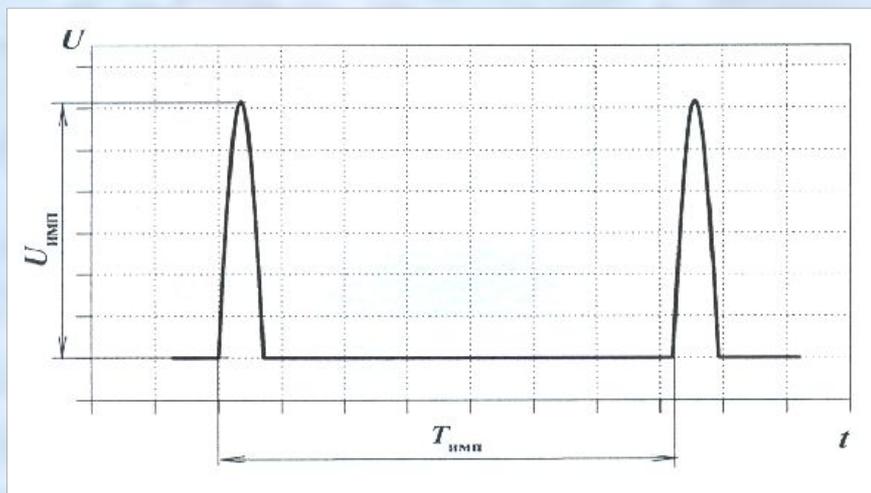


Градуировочная кривая для кремния n-типа проводимости

# Трехзондовый метод

Зонды 1 и 2 изготавливаются из инструментальной стали или твердых специальных сплавов, что позволяет получить низкие контактные сопротивления. Сопротивление контактного барьера должно быть достаточно высоким, поэтому контактирующую поверхность зонда 3 делают с малым радиусом закругления - порядка нескольких единиц или десятков микрометров. Такие зонды изготавливают из твердых материалов, а давление на зонд строго эталонируют и устанавливают по возможности минимальным, но обеспечивающим хорошую воспроизводимость результатов измерений.

Применялись также зонды из высоколегированного кремния ( $\rho=0.001 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ), как n-, так и p-типов проводимости, радиус закругления острия которых составлял примерно 1 мкм.



Осциллограмма импульсного напряжения

Мощность, выделяемая в контакте, приводит к локальному разогреву полупроводника, который может вносить погрешность в измеряемую величину напряжения пробоя. Поэтому измерения проводят в импульсном режиме с минимальными длительностями импульсов колоколообразной формы. Частота импульсов - 50 - 100 Гц, скважность 40 - 50.

Еще один источник систематической погрешности – это поверхность образца, так как пробивное напряжение точечного контакта зависит от способа ее обработки. Калибровочные образцы, как правило, подвергаются механической и химической полировке, тогда как поверхность эпитаксиального слоя никаким обработкам не подвергается.

# Трехзондовый метод

При малых толщинах  $n$ -слоя на  $p^+$ -подложке корреляционная связь между пробивным напряжением контакта барьера и удельным сопротивлением (концентрацией легирующей примеси) эпитаксиального слоя нарушается, так как при увеличении обратного смещения ОПЗ контакта расширяется в глубь эпитаксиального слоя и при некотором значении  $U$  смыкается с подложкой. Так как ОПЗ незначительно проникает в сильнолегированную подложку, то при дальнейшем увеличении напряжения на барьере электрическое поле в ОПЗ будет возрастать с большей скоростью и пробой наступит при более низком напряжении, чем для однородно легированного кремния. Это напряжение пробоя уже не находится в корреляционной связи с удельным сопротивлением и трехзондовый метод полностью теряет свою достоверность.

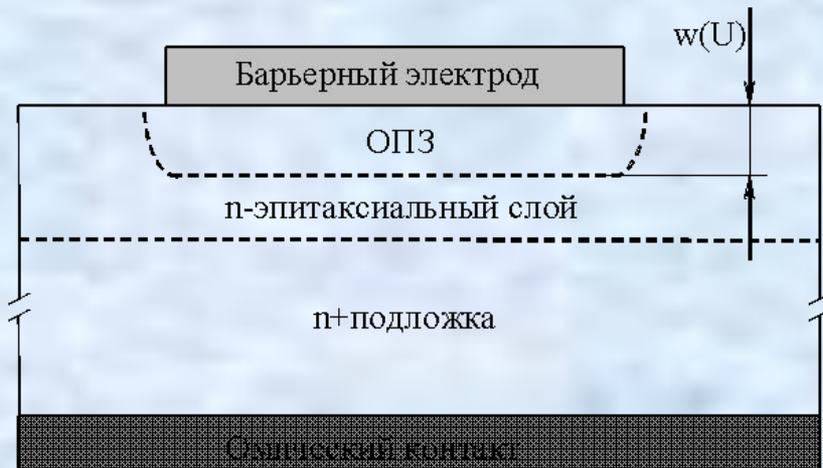
При практическом использовании трехзондового метода необходимо знать те критические значения толщины эпитаксиальных слоев, при которых они доступны измерению. Для численных оценок можно воспользоваться известной формулой для зависимости ширины области объемного заряда  $w$  от напряжения смещения  $U$  контакта с барьером Шоттки.

$$w = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(V_B - U)}{eN_D}}, \text{ откуда } U \approx w^2 \frac{eN_D}{2\epsilon\epsilon_0}, \text{ или } U \approx w^2 \frac{1}{2\epsilon\epsilon_0\mu_n\rho}.$$

Для каждой пары значений  $U_B$  и  $\rho$ , взятых из калибровочного графика, рассчитывают ширину области объемного заряда  $w$ , которая соответствует напряжению пробоя для данного значения удельного сопротивления  $\rho$ . Полученные величины  $w$  равны тем минимальным значениям толщины низколегированного слоя, которые определяют нижний предел применимости трехзондового метода.

# Метод ВФХ контакта МП

Метод вольт-фарядных характеристик широко применяется в исследованиях и производстве БИС для контроля концентрации легирующей примеси и ее распределения по толщине полупроводниковых слоев.



Поперечное сечение контакта МП на n-p<sup>+</sup> структуре

- На рисунке представлено схематичное изображение поперечного сечения контакта с барьером Шоттки на основе эпитаксиальной n-p<sup>+</sup> структуры. Толщина ОПЗ контакта МП  $w$  связана с его емкостью  $C$  соотношением

$$w = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{C}$$

где  $S$  – площадь контакта,  $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф·м-1,  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника.

Емкость контакта металл-полупроводник  $C$  на основе однородно легированного полупроводника n-типа проводимости, с

концентрацией доноров  $N_D = \text{const}$  зависит от напряжения  $U$  между металлом и полупроводником.

$$C(U) = S \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 e N_D}{2(V_B - U)}}$$

где  $e$  – абсолютное значение заряда электрона,  $eV_B$  – высота потенциального барьера контакта со стороны полупроводника.

# Метод ВФХ контакта МП

Зависимость квадрата обратной емкости такого контакта от напряжения линейная.

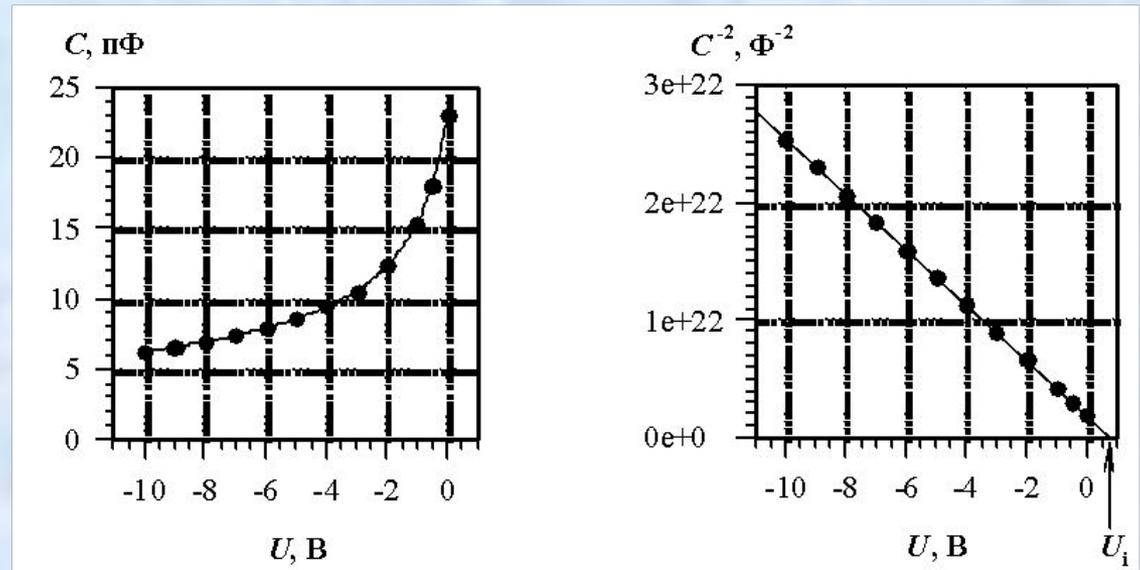
$$C^{-2}(U) = \frac{1}{S^2} \frac{2(V_B - U)}{\epsilon \epsilon_0 e N_D}.$$

Концентрацию донорной примеси определяют по формуле

$$N_D = - \frac{2S^2}{\frac{d(C^{-2})}{dU} e \epsilon \epsilon_0}.$$

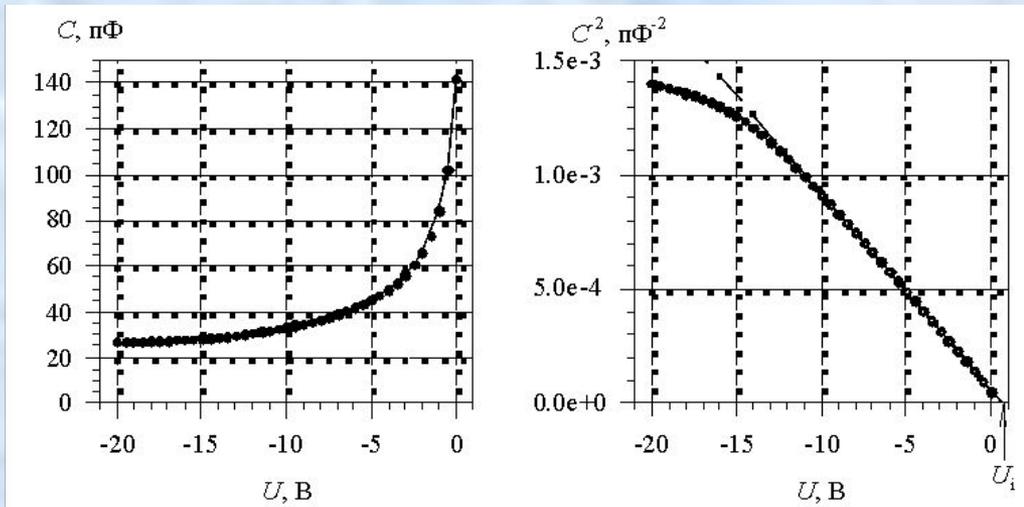
Во многих случаях концентрация легирующей примеси в полупроводнике  $N_D$  не постоянна, а является функцией координаты -  $N_D(x)$ . Например, в  $n-n^+$  эпитаксиальных структурах с достаточно тонким эпитаксиальным слоем концентрация донорной примеси резко возрастает, начиная с некоторой глубины, при переходе от слаболегированного слоя к высоколегированной подложке.

В этих случаях зависимость  $C^{-2}=f(U)$  не линейна, и вышеприведенные формулы нельзя использовать для всех точек ОПЗ.



Зависимости  $C=f(U)$  и  $C^{-2}=f(U)$  контакта МП на подложке с  $N_D=const$

# Метод ВФХ контакта МП



зависимости  $C=f(U)$  и  $C^2=f(U)$  контакта МП на подложке с  $N_D \neq \text{const}$

На рисунке представлены графики зависимостей  $C(U)$  и  $C^2(U)$  контакта МП, в случае, когда  $N_D$  резко возрастает при переходе от  $n$ -слоя к  $n^+$ -подложке. Пунктирной прямой на графике  $C^2=f(U)$  показано, как бы она шла при  $N_D=\text{const}$ . При напряжениях  $U < -10$  В измеренная зависимость  $C^2=f(U)$  и прямая линия расходятся. Можно считать, что до глубины  $x=w$  ( $-10$  В)  $N_D=\text{const}$ , а далее возрастает.

Дифференциальную емкость контакта металла с полупроводником  $n$ -типа проводимости можно выразить как производную заряда в ОПЗ по напряжению, а заряд в ОПЗ через его толщину  $w$ .

$$C = \frac{dQ_{sc}}{dU} = \frac{d\left(\int_0^{\infty} I(t) dt\right)}{dU} = en(w)S \frac{dw}{dU},$$

где  $I(t)$  - ток, обуславливающий изменение заряда  $Q_{sc}$  на емкости  $C$ .

# Метод ВФХ контакта МП

Концентрация свободных носителей

$$n(x) = -\frac{2}{e\epsilon\epsilon_0 S^2} \left[ \frac{d(C^{-2})}{dU} \right]^{-1}.$$

Производную  $\frac{d(C^{-2})}{dU}$  можно определить графическим дифференцированием измеренной зависимости  $C^{-2}=f(U)$  по методу конечных приращений.

$$n(x) = -\frac{2}{e\epsilon\epsilon_0 S^2} \cdot \frac{\Delta U}{\Delta C^{-2}}.$$

Вычисления по этой формуле дают значение концентрации электронов на глубине  $x$  от поверхности полупроводника. Расстояние  $x$  соответствует значению емкости, лежащей посередине интервала  $\Delta C = C_i - C_{i+1}$ , выбираемого при графическом

дифференцировании экспериментальной кривой, то есть  $x = \frac{2\epsilon\epsilon_0 S}{C_i + C_{i+1}}$ . Вышеприведенная

формула получена для наиболее общего случая произвольного распределения примесей по объему исследуемого образца. В частном случае при небольших градиентах концентрации примесей, когда по всему исследуемому объему полупроводника сохраняются условия электронейтральности, концентрация носителей равна концентрации легирующей примеси  $n(x)=N_D(x)$ .

# Метод ВФХ контакта МП

В современных автоматизированных установках определение профиля  $N_D(x)$  или  $N_A(x)$  производится с помощью численного дифференцирования не линейной зависимости  $C^{-2}=f(U)$ .

Распределение  $N_D$  по  $x$  может быть рассчитано по следующим формулам.

$$x_i = w(U_i) = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{C(U_i)}, \quad N_D(x_i) = -\frac{2}{e\varepsilon\varepsilon_0 S^2} \left[ \frac{d\left(\frac{1}{C^2}\right)}{dU} \Big|_{U_i} \right]^{-1}$$

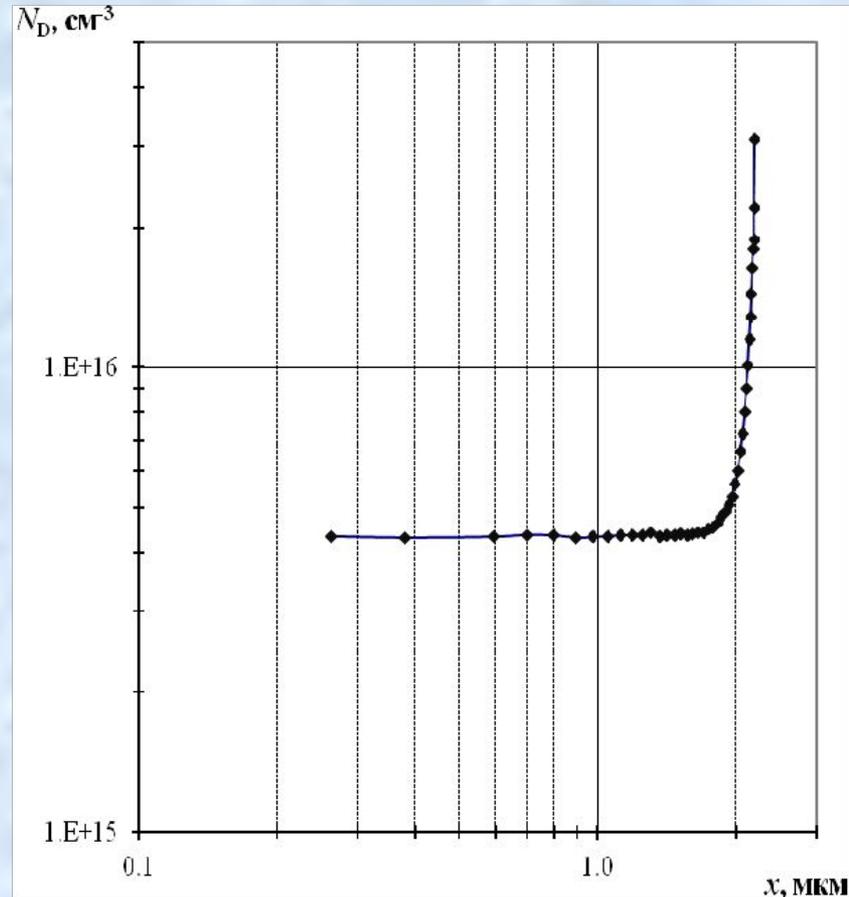
где  $w(U_i)$  и  $C(U_i)$  и  $\frac{d\left(\frac{1}{C^2}\right)}{dU} \Big|_{U_i}$  – соответственно толщина ОПЗ, емкость контакта и производная функции  $C^{-2}(U)$  по напряжению при напряжении  $U_i$ .

По зависимости  $C(U)$  по вышеприведенным формулам можно определить профиль легирования приповерхностного слоя полупроводника вплоть до глубины  $x=w_{\max}$ .  $w_{\max}$  вычисляют по следующей формуле.

$$w_{\max} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{C_{\min}}$$

где  $C_{\min} = C(U_{\min})$ , а  $U_{\min}$  – минимальное (максимальное по абсолютной величине) значение напряжения, приложенного к контакту МП.

# Метод ВФХ контакта МП



Профиль распределения концентрации в n-эпитаксиальном n-слое на высоколегированной  $n^+$ -подложке

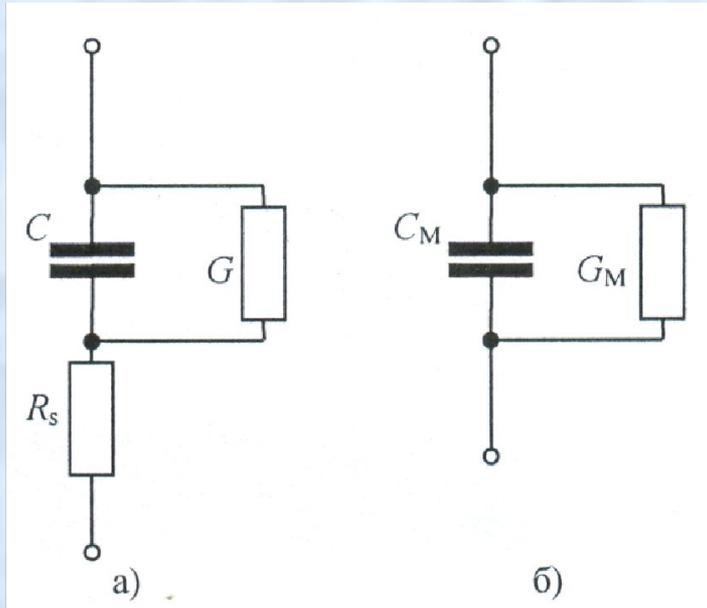
Профиль распределения концентрации по толщине полупроводникового слоя принято изображать в двойном логарифмическом масштабе. На рисунке представлено распределение концентрации донорной примеси в n-эпитаксиальном слое арсенида галлия, выращенном на высоколегированной  $n^+$ -подложке.

Профиль легирования в приповерхностном слое полупроводника можно определить CV-методом вплоть до глубины  $x=w_{\text{max}}$ . Максимальную глубину  $w_{\text{max}}$  вычисляют по следующей формуле.

$$w_{\text{max}} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{C_{\text{min}}}$$

где  $C_{\text{min}} = C(U_{\text{min}})$ , а  $U_{\text{min}}$  – минимальное (максимальное по абсолютной величине) значение напряжения, приложенного к контакту МП.

# Метод ВФХ контакта МП



Эквивалентные схемы контакта:  
а – реальная, б - по отношению ко входу измерителя емкости

$C$  – емкость обедненного слоя,  $G$  – проводимость, описывающая утечку контакта,  $R_s$  – последовательное сопротивление образца.

По отношению ко входу измерителя емкости объект измерений описывается параллельной двухэлементной эквивалентной схемой. Частота измерительного сигнала  $f$ , непосредственно измеренные  $C_M$ ,  $G_M$  и действительные  $C$ ,  $G$ ,  $R_s$  значения параметров контакта связаны выражениями

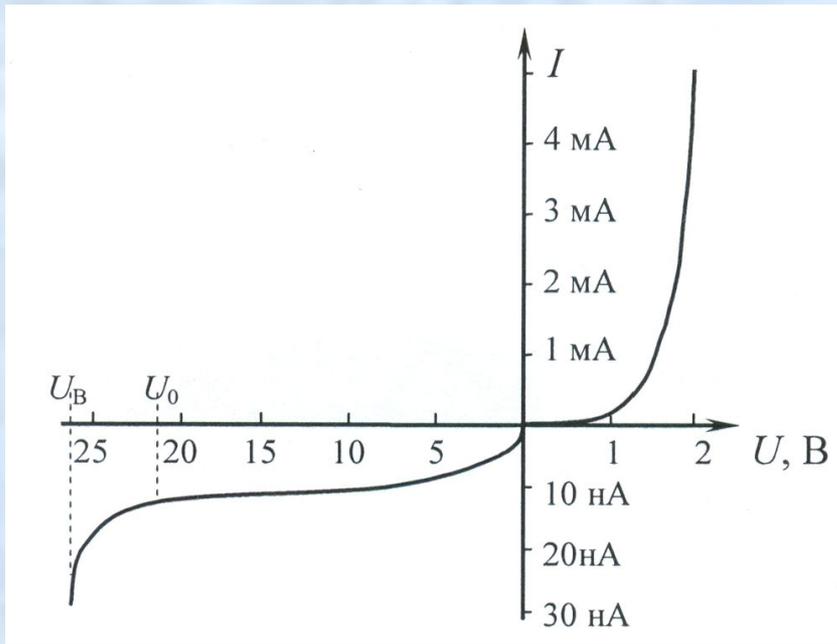
$$C_M = \frac{C}{(1 + GR_s)^2 + (2\pi f R_s C)^2},$$
$$G_M = \frac{G(1 + GR_s) + R_s(2\pi f C)^2}{(1 + GR_s)^2 + (2\pi f R_s C)^2}.$$

При  $R_s \approx 0$  получим:  $C_M = C$ ,  $G_M = G$ . Это однако, редко реализуется, так как сумма сопротивлений объема образца и омического контакта лежит обычно в диапазоне 5 - 200 Ом.

Случай  $G \approx 0$  реализуется в высококачественных контактах металл-полупроводник при правильном выборе диапазона напряжений смещения. Для этого случая можно оценить последовательное сопротивление объекта измерений.

$$R_s = \frac{G_M}{G_M^2 + (2\pi f C)^2}.$$

# Метод ВФХ контакта МП



ВАХ реального контакта металл-полупроводник

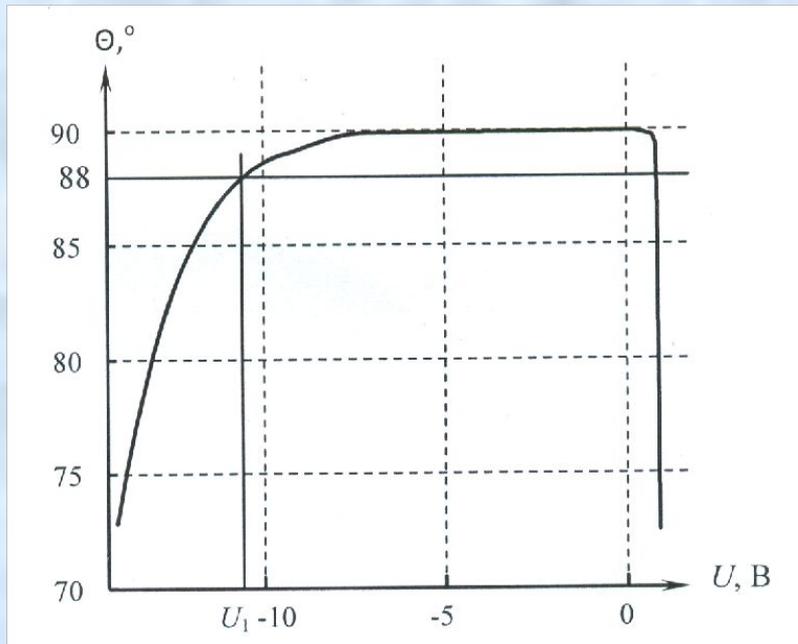
$U_0$  – напряжение, при котором появляются существенные утечки,  $U_B$  – напряжение пробоя контакта

Присутствие промежуточного диэлектрического слоя того или иного состава приводит к тому, что ВАХ барьерного контакта отличается от идеальной. В диэлектрическом слое локализованы центры, зарядовое состояние которых может изменяться при приложении к контакту напряжения.

С энергетическими уровнями этих центров связаны дополнительные механизмы протекания токов утечки. Ток утечки появляется уже при малых обратных смещениях, а при некотором значении обратного смещения  $U_0$ , существенно меньшем, чем  $U_B$ , этот ток быстро нарастает.

Если ток утечки, протекающий через контакт при обратных напряжениях  $U < U_0$ , не слишком велик, возможность выполнения СВ-измерений сохраняется, хотя точность этих измерений падает. При  $U > U_0$  достоверные измерения невозможны. Можно сказать, что отличие формы ВАХ барьерного контакта металл-полупроводник от идеальной приводит, в лучшем случае, к сужению диапазона напряжений, в котором СВ-измерения могут быть выполнены с приемлемой точностью.

# Метод ВФХ контакта МП



Зависимость фазового угла от напряжения на контакте

Характеристика совместного влияния проводимости утечки и последовательного сопротивления контакта МП - величина фазового угла  $\theta$ .  $\operatorname{tg}\theta$  - это отношение емкостной и активной составляющих полного сопротивления контакта:

$$\operatorname{tg}\theta = -\frac{2\pi fC}{G}$$

Фазовый угол равен  $90^\circ$  ( $-90^\circ$ ), когда и утечка, и последовательное сопротивление контакта пренебрежимо малы, и уменьшается с ростом утечки и/или последовательного сопротивления.

Емкость ОПЗ  $C$  уменьшается с ростом  $U_R$  на контакте; значит, возрастает емкостная составляющая полного сопротивления контакта  $X_C$ .  $G$  можно считать постоянной вплоть до значений  $U=U_0$ , а при  $U>U_1=U_0$  - возрастающей с ростом  $U_R$ .  $R_s$  от  $U$  обычно не зависит.

Точность измерения концентрации не хуже 5% достигается при значениях  $\theta>88^\circ$ , которое служит критерием выбора диапазона обратных смещений  $\Delta U_{\text{изм}}$ . В этом диапазоне можно выполнять CV-измерения, а сравнение диапазона  $\Delta U_{\text{изм}}$  с диапазоном  $0 \text{ В} - U_B$  дает оценку качества измерительного контакта. Чем уже приемлемый для измерений диапазон смещений, тем в меньшем диапазоне глубин будет найден график профиля легирования.

# Метод ВФХ контакта МП

Относительная случайная погрешность метода погрешность определения концентрации рассчитывается по следующей формуле

$$\left(\frac{\delta n}{n}\right)^2 = 16\left(\frac{\delta D}{D}\right)^2 + \left[\frac{2(1-\gamma)}{\gamma^2}\right]\left(\frac{\delta C}{C}\right)^2,$$

где  $\gamma = \frac{\Delta C}{C}$ .

Первый член этого соотношения определяет погрешность измерения диаметра диодной структуры, второй - погрешность, связанную с измерением производной  $\frac{dC^{-2}}{dU}$ .

Погрешность в измерении напряжения не принимается во внимание, так как предполагается, что точность задания напряжения очень высока и погрешность задания напряжения равна 0. Погрешность измерения площади барьера зависит от способа его изготовления и размеров. При создании контакта МП методами напыления металла барьерного электрода в вакууме и фотолитографии погрешность измерения площади диодных структур диаметром более 0.5 мм может быть снижена до 0.5%.

Современные автоматизированные измерители R,C,L на базе прецизионных емкостных мостов позволяют измерять емкость с высокой точностью  $\frac{\delta C}{C} = 0.1-1\%$ .

Погрешность, допускаемая при дифференцировании экспериментальной кривой, будет в значительной мере зависеть от выбираемого способа численного дифференцирования.

# Метод ВФХ контакта МП

## Контакт ртуть-полупроводник

Для промышленного контроля в производстве полупроводниковых материалов или интегральных микросхем в качестве металла барьерного электрода обычно используют ртуть, что необходимо для снижения затрат времени на подготовку образцов.

Ртутный контакт можно создать, прижав к поверхности полупроводника

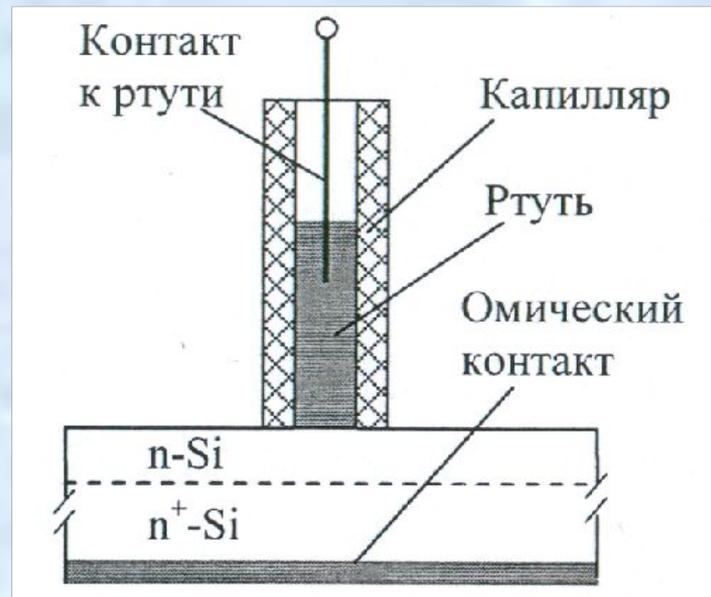
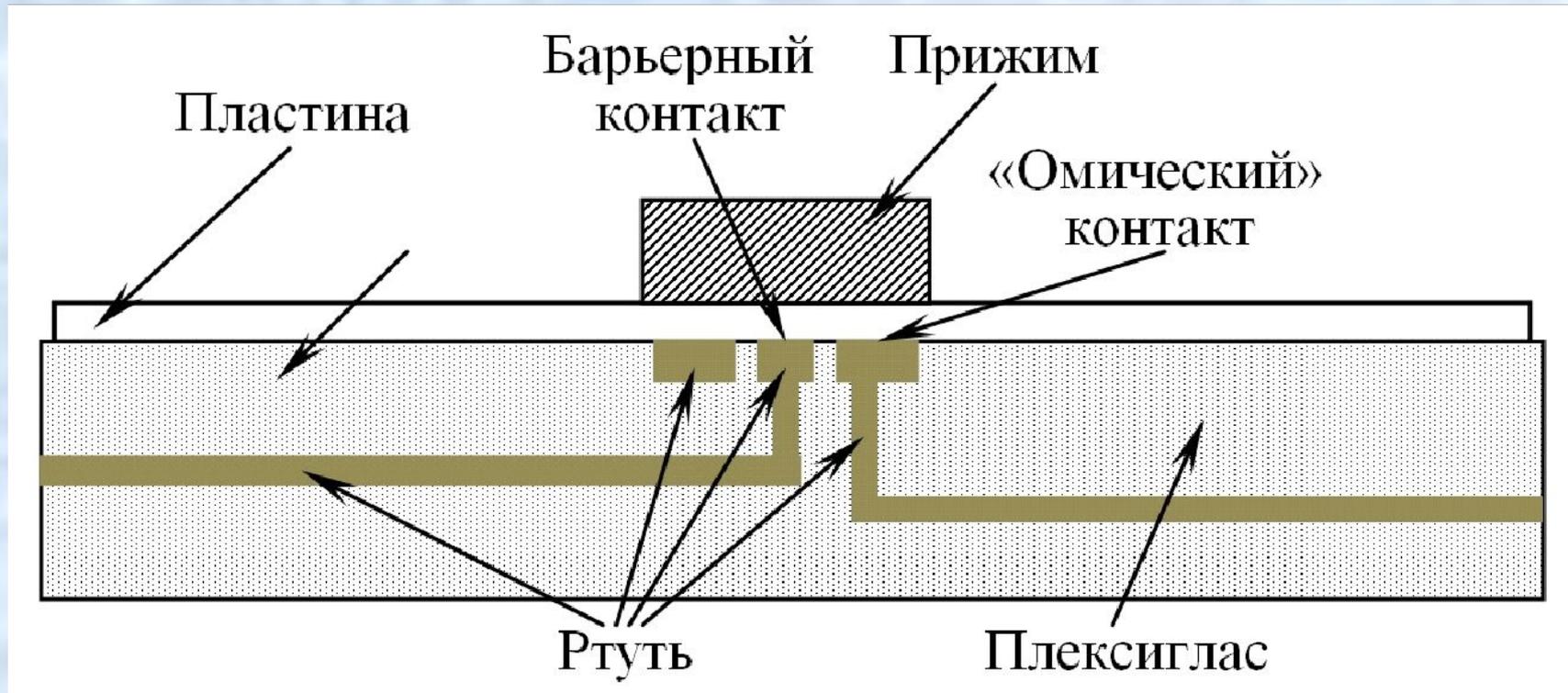


Схема создания ртутного контакта

торец капилляра, заполненного чистой ртутью, которая не смачивает поверхности большинства полупроводников, что избавляет от проблем самопроизвольного просачивания ртути в зазор между торцом капилляра и поверхностью полупроводника. Однако из-за отсутствия смачивания в капилляре необходимо создавать избыточное давление ртути.

# Метод ВФХ контакта МП

## Контакт ртуть-полупроводник



Схематичное изображение поперечного сечения ртутного зонда с «нижним» расположением контактов

# Метод ВФХ контакта МП

## Контакт ртуть-полупроводник

Применение ртутного капилляра вносит дополнительную ошибку в погрешность измерений концентрации. Эта ошибка носит как систематический, так и случайный характер.

Причиной ее появления служит то обстоятельство, что площадь ртутного контакта и ее воспроизводимость зависят от давления ртути в капилляре.

Воспроизводимость площади контакта, важная для обеспечения точности СВ-измерений, достигается выбором величины и обеспечением стабильности давления в капилляре. Также воспроизводимость площади зависит от за чистоты ртути.

Так как поверхностное натяжение ртути очень велико, то свободная поверхность ртути в капилляре при ее контакте с измеряемым образцом образует по краям выпуклый мениск.

Поверхность же образца, смачиваемая ртутью, будет меньше площади геометрического сечения капилляра. С увеличением давления в капилляре радиус кривизны мениска увеличивается, площадь смачиваемой поверхности образца возрастает, приближаясь к площади сечения капилляра.

# Метод ВФХ контакта МП

## Контакт ртуть-полупроводник

### Другие источники погрешности измерения концентрации.

- Краевой эффект, который наиболее сильно проявляется при измерении высокоомных образцов с малыми размерами барьерного электрода. Влияние этого эффекта можно ограничить, увеличив площадь измеряемого барьера.
- Токи утечки барьерного электрода, возникающие обычно при больших  $U_R$  и при измерениях на сильнолегированных образцах.
- Фотоэлектрические явления на контакте. Для устранения этой ошибки измерения надо проводить в темновых условиях.
- Индуктивность кабелей и конструктивная емкость контактного устройства.

Для корректного измерения емкости и фазового угла контакта ртуть-полупроводник необходимо учитывать влияние индуктивности  $L_C$  кабелей, соединяющих объект измерений с измерительным прибором, а также влияние конструктивной паразитной емкости  $C_{comp}$  контактного устройства. Простейший способ определить величину конструктивной емкости  $C_{comp}$  контактного устройства – поместить в это устройство вместо полупроводникового образца диэлектрическую (стеклянную) пластинку, толщина которой близка к толщине образцов.

# Метод ВФХ контакта МП

## Контакт ртуть-полупроводник

### Другие источники погрешности измерения концентрации.

- Последовательное сопротивление контактного устройства.

Оно может стать заметным в случае ухудшения контакта между ртутью и погруженным в нее металлическим электродом.

- Влияние приповерхностной области полупроводника.

Свойства ее могут существенно отличаться от свойств объема, что связано со способностью приповерхностной области аккумулировать некоторые примеси и дефекты. Иногда пригодный для CV-измерений контакт МП не удается создать именно по этой причине.

Определяющее влияние на пригодность контакта ртуть-кремний для CV-измерений оказывает обработка поверхности кремния, выполняемая перед измерениями. Характер необходимой обработки зависит от типа проводимости приповерхностного слоя образца и – в меньшей степени – от удельного сопротивления этого слоя, кристаллографической ориентации поверхности и от «истории» образца. Чаще всего образцы p-Si обрабатывают фтористоводородной кислотой, а образцы n-Si – раствором перекиси водорода. Детали технологического процесса здесь не рассматриваются, хотя на практике они чрезвычайно важны.

# Метод ВФХ контакта МП

## Контакт ртуть-полупроводник

В.В.Батавиным показана следующая зависимость радиуса ртутного контакта от давления

$$R = \frac{1}{2} \left[ r - \frac{\sigma}{\rho g p} (\cos \beta - 2 \sin \beta) + \sqrt{r - \frac{\sigma}{\rho g p} (\cos \beta - 2 \sin \beta)^2 - \frac{4 \sigma r \sin \beta}{\rho g p}} \right],$$

где  $r$  – радиус капилляра;  $\sigma$  - поверхностное натяжение ртути;  $\rho$  - плотность ртути;  $g$  - ускорение силы тяжести;  $p$  - давление ртути в манометре в мм. рт. ст.;  $\beta$  - угол смачивания.

Эта формула справедлива для  $\beta > 135^\circ$ , когда мениск сохраняет выпуклую форму.

Своего предельного значения, равного геометрическому сечению капилляра, площадь контакта может достигнуть только при бесконечно большом давлении, поэтому на практике реальная площадь контакта всегда меньше площади сечения капилляра, что является источником систематической погрешности метода ВФХ контакта Шоттки «ртуть-полупроводник». Неточность в контролировании давления ртути в капилляре приводит к невозпроизводимости площади контакта и появлению случайной погрешности.

# Метод ВФХ контакта МП

## Контакт ртуть-полупроводник

Для диаметра капилляра 1 мм при давлении 200 мм рт. ст. систематическая погрешность в определении концентрации составляет -4%, а случайная  $\pm 1.5\%$  при контролировании давления с погрешностью  $\pm 2$  мм рт. ст.

Воспроизводимость площади контакта, важная для обеспечения точности CV-измерений, достигается выбором величины и обеспечением стабильности давления в капилляре. Необходимо также следить за чистотой ртути, так как примеси и загрязнения снижают коэффициент ее поверхностного натяжения.

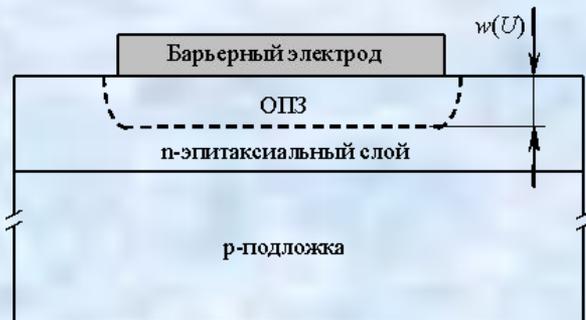
Зависимость площади ртутного контакта от характера рельефа поверхности полупроводникового образца очевидна. Поэтому говорить о точности CV-измерений можно лишь при условии, что образцы имеют поверхность, которая при наблюдении невооруженным глазом выглядит зеркальной. Отдельные крупные дефекты могут привести к появлению сколов на краю рабочего отверстия капилляра.

# Метод ВФХ контакта МП

## Измерения в образцах с р-n-переходом или диэлектрическим слоем на обратной стороне

Типичный пример образца с р-n-переходом – эпитаксиальный слой n-типа проводимости на подложке р-типа проводимости (или наоборот). Если полярность приложенного к БШ напряжения обратная, то р-n-переход оказывается под прямым, а вернее под почти нулевым смещением, так как при отсутствии значительной утечки контакта Шоттки все приложенное напряжение падает на его обедненном слое.

Барьерная емкость р-n-перехода включена последовательно с емкостью обедненного слоя БШ. Эффективная площадь р-n-перехода определяется



Поперечное сечение контакта МП на n-p структуре

- характером растекания тока в слое; в случае относительно высокого удельного сопротивления слоя и (или) малой его толщины она близка к площади контакта Шоттки. Измеряемая емкость при этом меньше, чем интересующая нас емкость обедненного слоя, поэтому измеряемое значение удельного сопротивления эпитаксиального слоя оказывается выше действительного.

# Метод ВФХ контакта МП

## Измерения в образцах с р-n-переходом и диэлектрическим слоем на обратной стороне

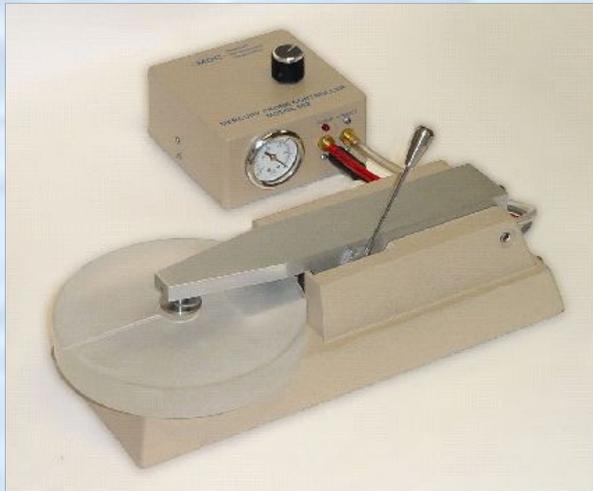
Ошибка возрастает при малых смещениях, при которых велика емкость обедненного слоя, поэтому измерения в образцах с р-n-переходом рекомендуется начинать при значениях обратного смещения более 5 В.



Поперечное сечение контакта МП на n-n<sup>+</sup> структуре со слоем SiO<sub>2</sub> на обратной стороне подложки

Аналогичная картина наблюдается в образцах, на обратной стороне которых имеется диэлектрический слой. Здесь последовательно с емкостью обедненного слоя включены емкость слоя диэлектрика и проводимость его утечки. Ошибка измерений возрастает с увеличением толщины диэлектрического слоя, а также с ростом сопротивления подложки.

# Метод ВФХ контакта МП



Манипулятор со ртутным зондом



Форма контактов ртутного зонда

Фирма Materials Development Corporation (MDC) производит ртутные зонды серии 802В и 860В, представляющие собой прецизионный инструмент, который может быть соединен с автоматизированным С-V измерителем, например, Agilent 4284В, и позволяет измерять профили концентрации легирующей примеси в полупроводниковых слоях.

Номинальный диаметр ртутного капилляра, (барьерный контакт) – 760 мкм. Имеется возможность установки капилляров другого диаметра. «Омический» контакт может осуществляться к обратной стороне пластины и к лицевой стороне (ртутное не замкнутое кольцо). Воспроизводимость площади барьерного контакта – 1.1 %. Диаметр контролируемых пластин – до 300 мм. Контролируемая пластина располагается на манипуляторе лицевой стороной вниз.

Модель 860В используется для измерения распределения концентрации по пластине.

# Метод ВФХ контакта МП



Автоматизированные системы измерения полупроводников фирмы MDC

# Метод ВФХ контакта МП

Фирма Solid State Measurements (SSM) производит прецизионное автоматизированное оборудование (системы SSM 495, SSM 530 и SSM 5130), оснащенное манипуляторами с ртутными зондами для исследовательского и производственного контроля профилей концентрации примеси на пластинах диаметром от 75 мм до 300 мм. Манипуляторы этой фирмы отличаются от манипуляторов производства фирмы MDC тем, что пластина размещается на манипуляторе обратной стороной, что препятствует повреждению пластины, а ртутный зонд контактирует с лицевой стороной пластины сверху.



Автоматизированная система  
CV измерений SSM495

Эти системы являются универсальными прецизионными измерителями вольфардных характеристик контактов МП и МОП структур. В том числе эти системы предназначены для измерения удельного сопротивления кремниевых эпитаксиальных слоев, определения профилей концентрации легирующей примеси в тонких слоях кремния, легированных ионами примесей с малыми дозами.