

Экспериментальное исследование МДП-структур

Высокочастотные ВФХ МДП-структур

При исследовании поверхностных явлений в полупроводниках наибольшее распространение на практике получил метод высокочастотных ВФХ.

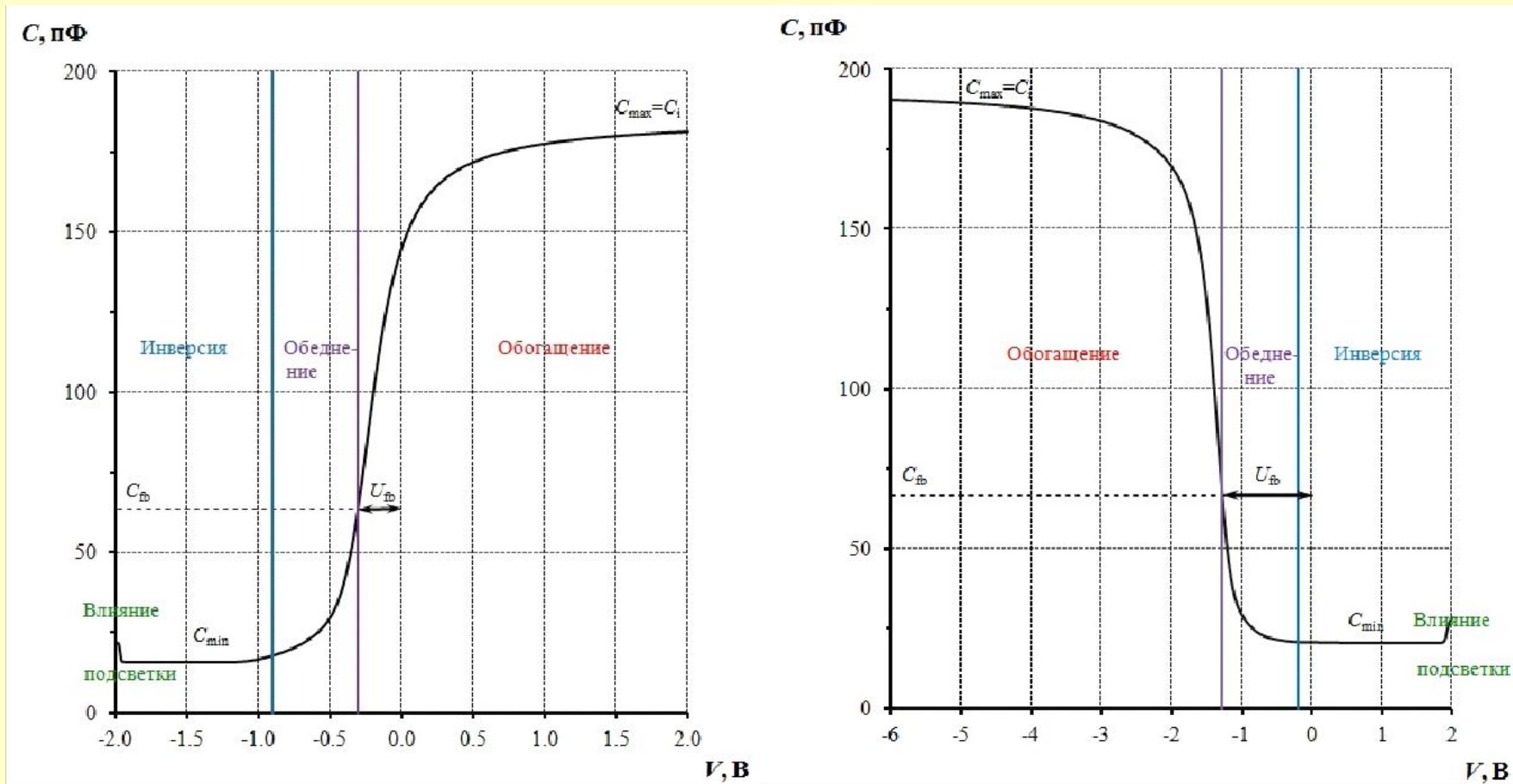
На рис.10 представлены высокочастотные ВФХ реальных МОП-структур, измеренные при $T=298$ К. МОП-структуры созданы на кремниевых подложках n-типа проводимости марки КЭФ-4.5 с концентрацией фосфора $N_D=1.0 \cdot 10^{15}$ см⁻² (а) и p-типа проводимости марки КДБ-10 с концентрацией бора $N_A=1.2 \cdot 10^{15}$ см⁻² (б). Толщина подзатворной двуокиси кремния составляла $d_{ox} \approx 26$ нм.

Перед началом измерения ВФХ на МОП-структуру при освещении подают напряжение, соответствующее режиму инверсии с целью формирования равновесного инверсионного слоя. Измерение проводят в темновых условиях. Напряжение V изменяют от режима инверсии к режиму обогащения.

Измерение ВЧ ВФХ МДП-структур может быть реализовано различными способами: резонансным методом, методом R-С-делителя, методом С-С делителя, мостовым способом и др.

Блок-схемы достаточно простых измерительных установок с автоматической регистрацией С-V характеристики на графопостроителе представлены на рис.11 а, б.

Экспериментальное исследование МДП-структур



а)

б)

Рис.10. ВФХ МОП-структур, измеренные при $T=298$ К. Кремниевые подложки n-типа КЭФ-4.5 с концентрацией фосфора $N_D=1.0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (а) и КДБ-10 с концентрацией бора $N_A=1.2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (б).

Экспериментальное исследование МДП-структур

11-а - (схема, реализующая метод R-C делителя).

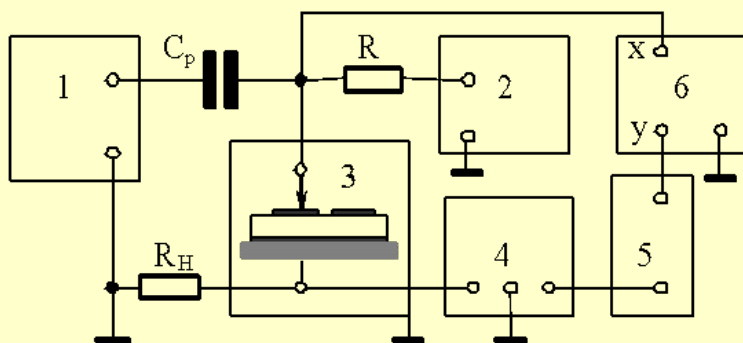


Рис.11-а. Блок-схема установки измерения ВФХ: 1 – ВЧ генератор; 2 – генератор напряжения развертки; 3 – измерительная камера с образцом; 4 – селективный микровольтметр; 5 – детектор; 6 – графопостроитель; C_p – разделительный конденсатор; R и R_H – резисторы

Высокочастотный сигнал ($f=1\text{МГц}$, $U_M=25\text{ мВ}\approx\varphi_T$) через разделительный конденсатор C_p ($C_p \gg C_{\text{МДП}}$), поступает на цепочку, состоящую из емкости МДП-структуры C и эталонного нагрузочного резистора R_H ($R_H=50 - 100\text{ Ом}$). Также к МДП-структуре прикладывается линейно изменяющееся напряжение развертки с генератора 2.

Падение переменного напряжения на R_H пропорционально емкости $C_{\text{МДП}}$ при условии $\frac{1}{\omega C} \gg R_H$. Сигнал с нагрузки

поступает на селективный микро-вольтметр (резонансный усилитель) 4, затем на детектор 5 и на канал «у» двухкоординатного самописца СП. Изменяющееся напряжение развертки $V(t)$ с генератора напряжения развертки 2 через резистор R подается на МДП-структуру и на вход «х» графопостроителя и на нем регистрируется ВФХ МДП-структуры.

Напряжение V можно изменять либо от режима инверсии к режиму обогащения, либо наоборот.

Экспериментальное исследование МДП-структур

11-б - (схема, реализующая метод не полностью сбалансированного R-C моста).

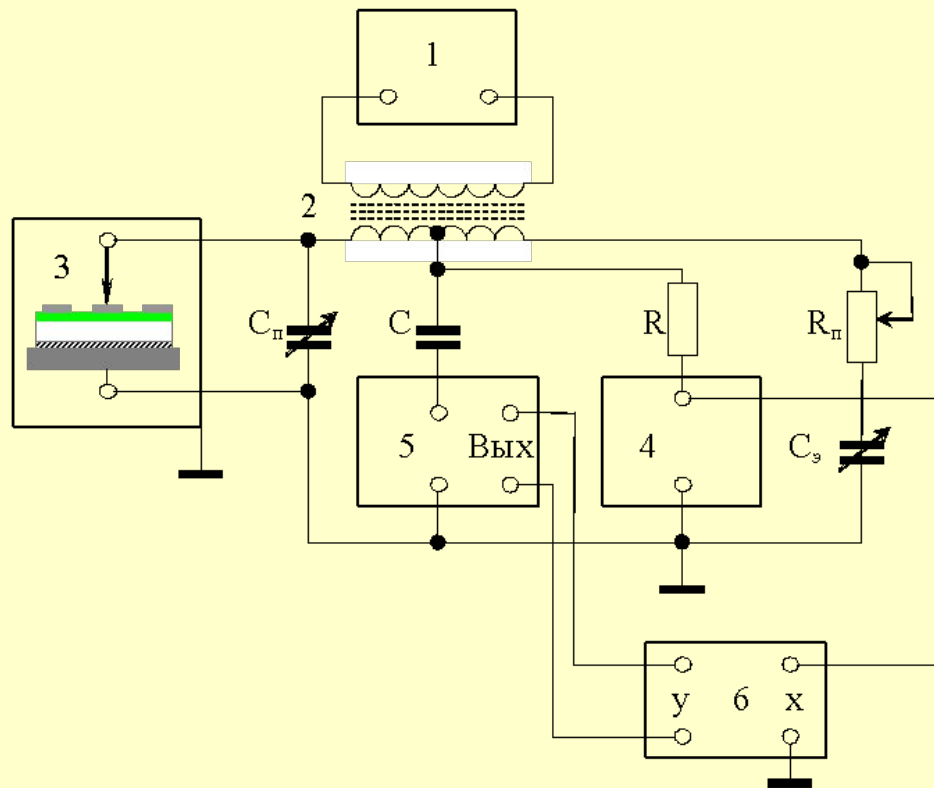


Рис.11-б. Блок-схема установки измерения ВФХ: 1 – ВЧ генератор; 2 – ВЧ трансформатор; 3 – камера с образцом; 4 – селективный микровольтметр; 5 – генератор напряжения развертки; 6 – графопостроитель; C – разделительный конденсатор; C_n – подстроечный конденсатор; C_s – эталонный конденсатор; R – резистор; R_n – подстроечный резистор.

Высокочастотный сигнал ($f=1$ МГц, $U=25$ мВ $\approx\phi_T$.) с генератора 1 через трансформатор 2 поступает на мостовую схему, левое плечо которой состоит из включенных параллельно конденсатора C_n и емкости МДП-структуры $C_{МДП}$, а правое плечо - из последовательно включенных эталонного конденсатора C_s и подстроечного резистора R_n . Через резистор R к МДП-структуре прикладывается напряжение развертки с генератора 4. Переменное напряжение разбаланса моста, пропорциональное $C_{МДП}$ поступает на селективный микровольтметр 5 с встроенным на выходе детектором. С выхода детектора микровольтметра 4 постоянное напряжение пропорциональное $C_{МДП}$ подается на вход «у» графопостроителя 6, на вход «х» подается напряжение с выхода генератора 4.

Экспериментальное исследование МДП-структур

Низкочастотные ВФХ МДП-структур

В области низких частот, когда период измерительного сигнала существенно больше времени жизни неосновных носителей τ в ОПЗ и постоянной времени поверхностных состояний τ_{ss} ($\omega^{-1} \gg \tau, \tau_{ss}$), полная емкость МДП-структуры определяется как

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_i} + \frac{1}{C_s + C_{ss}}$$

Вольт-фарадная характеристика, измеренная при этом условии, получила название - равновесная низкочастотная C-V характеристика. Такие низкочастотные ВФХ на подложке р-типа проводимости представлены на рис.12.

Измерения емкости на низких частотах ($f \approx 20$ Гц) очень сложны. Поэтому низкочастотные CV кривые обычно измеряют, используя метод динамических ВАХ МДП-структур (квазистатический C-V метод).

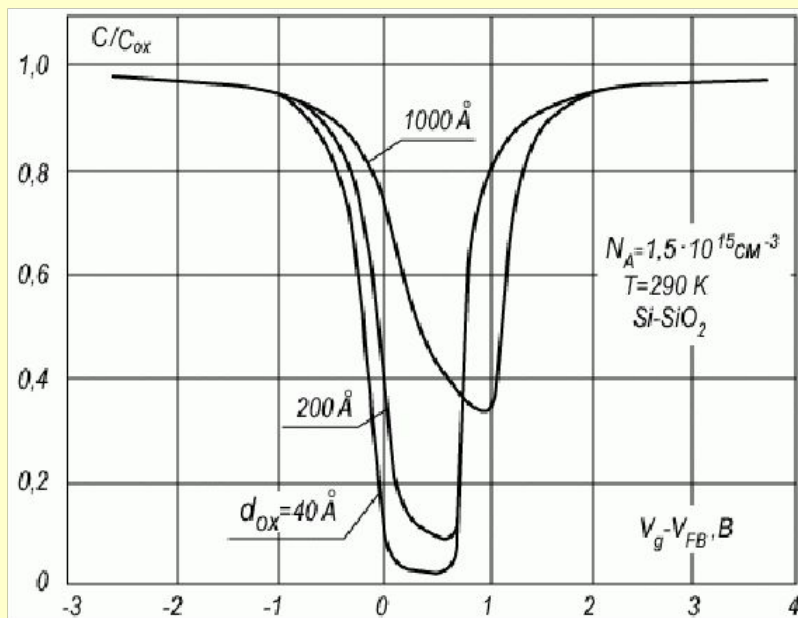
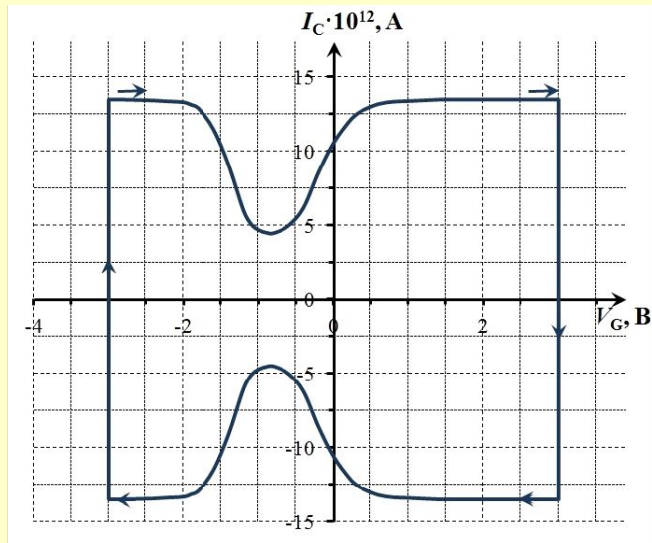
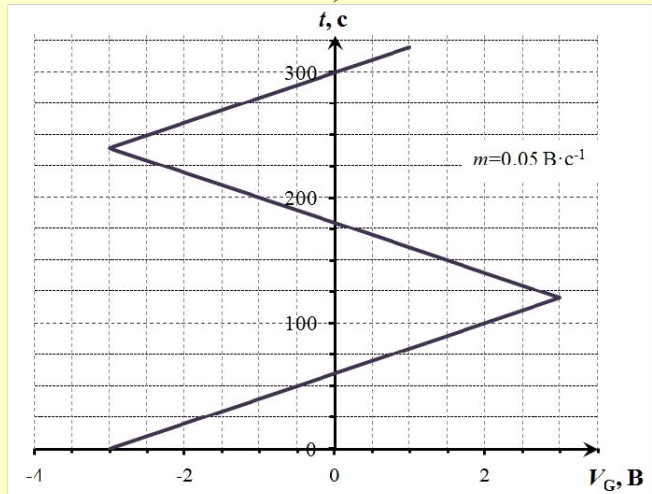


Рис.12. Равновесные C-V характеристики идеальных МДП-структур на кремнии р-типа с различной толщиной подзатворного диэлектрика

Экспериментальное исследование МДП структур



а)



б)

Рис.5.13. Ток через МДП структуру (а) и напряжение развертки (б).

Низкочастотные ВФХ МДП-структур

Измеряют ток смещения I через МДП-структуру при линейно изменяющемся во времени напряжении на затворе

$$U=mt,$$

где $m = \frac{dU}{dt}$ - скорость изменения напряжения на затворе МДП-структуры.

Величина тока смещения I пропорциональна емкости МДП-структуры.

$$I = \frac{dQ_M}{dt} = \frac{dQ_M}{dU} \cdot \frac{dU}{dt} = mC. \quad (5.26)$$

Если емкость МДП-структуры зависит от напряжения $C=C(U)$, то и ток смещения также будет зависеть от напряжения $I_{см}=I_{см}(U)=mC(U)$.

На рис.5.13 (а) представлены динамическая ВАХ МОП структуры с площадью полевого электрода $S=1.6 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ и толщиной подзатворной SiO_2 $d_{\text{ок}}=18 \text{ нм}$. Скорость изменения напряжения $m=0.05 \text{ В} \cdot \text{с}^{-1}$ (рис.5.13, б). Уровень легирования подложки составлял $N_D \approx 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ($\rho \approx 0.2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$).

Экспериментальное исследование МДП-структур

Низкочастотные ВФХ МДП-структур

Требование низкой частоты $\omega^{-1} \gg \tau$, τ_{ss} для измерения равновесных низкочастотных кривых обуславливает очень малое значение скорости изменения напряжения. Обычно эта величина составляет $m = 10^{-4} - 10^{-2}$ В/с.

При этих условиях ток смещения через МДП-структуру мал ($I_{см} \leq 1 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-12}$

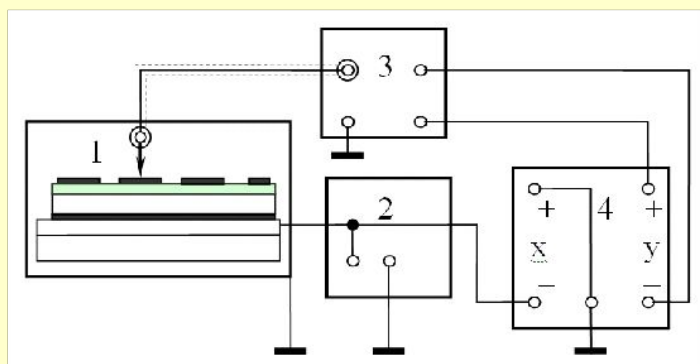


Рис.13. Блок-схема установки измерения квазистатических ВФХ МДП-структур: 1 – измерительная камера с размещенной на столе пластиной; 2 – генератор сигналов специальной формы; 3 – измеритель малых токов; 4 – графопостроитель

А) и для его измерения необходимо пользоваться электрометрическими вольтметрами. На рис.13 приведена простая схема реализации квазистатического метода. Для получения абсолютного отсчета емкости используются калибровочные емкости с малыми сквозными утечками, подключаемые вместо МДП-структуры.

Экспериментальное исследование МДП-структур



L,C,R измеритель Agilent 4284A “PRECISION LCR METER”

Основные характеристики

Частота тестового сигнала f : от 20 Гц до 1 МГц

Амплитуда тестового сигнала: от 5 мВ до 2 В

Измеряемая емкость C : от 0.01 фФ до 9.99999 Ф

Точность измерения емкости: 0.05 %

Интерфейс GPIB

Экспериментальное исследование МДП-структур



Автоматизированные C-V измерительные системы фирмы MDC
на базе L,C,R измерителя Agilent 4284A

Экспериментальное исследование МДП-структур

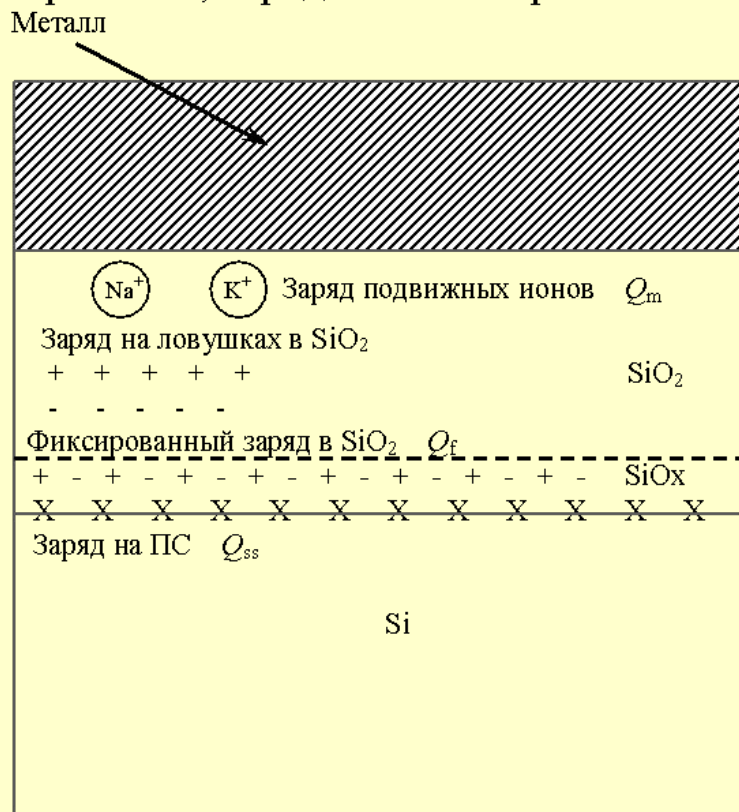


Измерительная камера с зондовой установкой фирмы Cascade Microtech
для измерения в темновых условиях

Экспериментальное исследование МДП-структур

Классификация зарядов в диэлектрике

Заряд в диэлектрике может быть обусловлен захватом носителей ловушками в диэлектрике и на границе Д-П, присутствием в диэлектрике ионов щелочных металлов и протонов, зарядом на поверхностных состояниях.



Классификация зарядов в двуокиси кремния

Экспериментальное исследование МДП-структур

Классификация зарядов в диэлектрике

Заряд в диэлектрике может быть обусловлен захватом носителей ловушками в диэлектрике и на границе Д-П, присутствием в диэлектрике ионов щелочных металлов и протонов, зарядом на поверхностных состояниях.

Заряд, захваченный на ловушки в диэлектрике (его плотность - $Q_t = eN_t$, $[Q_t] = \text{Кл} \cdot \text{см}^{-2}$, $[N_t] = \text{см}^{-2}$) – это заряд, обусловленный электронами или дырками, захваченными на глубоких уровнях в запрещенной зоне диэлектрика. Этот вид заряда может возникать, например, при облучении МДП структур ионизирующим излучением или в результате инжекции горячих электронов или дырок в диэлектрик. Ловушки, которые могут захватывать горячие носители заряда, более-менее равномерно распределены по толщине диэлектрика.

Фиксированный заряд (его плотность - $Q_f = eN_f$, $[Q_f] = \text{Кл} \cdot \text{см}^{-2}$, $[N_f] = \text{см}^{-2}$) – заряд, величина которого неизменна при не высоких температурах ($T \leq 300 \text{ К}$) и не очень большой напряженности электрического поля ($E < 5 \cdot 10^5 \text{ В/см}$). Он вызван наличием глубоких ловушек в диэлектрике. При изменении ϕ_s и уровня Ферми в полупроводнике эти центры не способны перезаряжаться. В структурах МОП фиксированный заряд расположен в SiO_2 на расстоянии (5–15) нм от Si. Природа центров связана со структурными дефектами переходного слоя от Si к SiO_2 и примесями.

Экспериментальное исследование МДП-структур

Классификация зарядов в диэлектрике

Подвижный заряд (его плотность - $Q_m = eN_m$, $[Q_m] = \text{Кл} \cdot \text{см}^{-2}$, $[N_m] = \text{см}^{-2}$) – заряд, который может мигрировать в диэлектрике под воздействием электрического поля или из-за диффузии при температурах $T > 500$ К. Подвижный заряд влияет на надежность и стабильность элементов кремниевых БИС. Подвижными зарядами в двуокиси кремния могут быть положительно заряженные ионы щелочных металлов (в основном, Na^+), протоны H^+ , кислородные вакансии. В системе Si - SiO_2 заряд Q_m , как правило, расположен на границе SiO_2 – металл). Внутренняя граница SiO_2 является блокирующей. При повышенной температуре и положительном напряжении на управляющем электроде подвижный заряд может перемещаться к границе Д-П, что приводит к сдвигу C-V характеристики. Это явление лежит в основе термополевых обработок (ТПО) МДП-структур, влияющего на надежность и стабильность МДП-приборов,

Энергия активации дрейфа ионов составляет (0.7 – 2.0) эВ. Ее основная часть расходуется на генерацию ионов из ловушек на границе металл-полупроводник.

Экспериментальное исследование МДП-структур

Классификация зарядов в диэлектрике

Заряд на поверхностных состояниях (дифференциальная плотность заряда на поверхностных состояниях - $Q_{ss}=eN_{ss}$, $[Q_{ss}]=\text{Кл}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{эВ}^{-1}$, $[N_{ss}]=\text{см}^{-2}\cdot\text{эВ}^{-1}$) - заряд, величина которого изменяется при изменении положения уровня Ферми и изменении ϕ_s . Плотность заряда ПС определяется суммой зарядов на донорных и акцепторных ПС. ПС способны обмениваться зарядом с ОПЗ за счет туннелирования в узкой (не более (2 – 3) нм) области.

Поверхностные электронные состояния, (англ.: surface states) это — электронные состояния, пространственно локализованные вблизи поверхности твёрдого тела.

ПС играют важную роль в физике полупроводников. Поэтому часто под ПС понимают состояния, находящиеся в запрещённой зоне, локализованные на границе полупроводника с какой-либо средой (диэлектрик, металл, электролит, газ, вакуум). Зарядовое состояние ПС определяется их положением относительно уровня Ферми .

Существование ПС на границе двух сред связывают с наличием разорванных связей на поверхности. Это уровни Тамма. Энергетический спектр разрешенных состояний на поверхности, где происходит обрыв периодического потенциала, включает состояния, соответствующие запрещенной зоне полупроводника. Волновые функции таких состояний экспоненциально затухают внутри кристалла. Это поверхностные состояния Шокли.

Экспериментальное исследование МДП-структур

Классификация зарядов в диэлектрике

Для описания ПС был создан ряд теоретических моделей, однако большинство из них констатируют лишь принципиальную возможность существования ПС, в то время как их истинная природа до настоящего времени остается невыясненной. Подтверждением этому является резкое расхождение между предсказанным числом ПС (по Тамму $N_{ss}=1\cdot 10^{15}$ см⁻²) и числом ПС, наблюдаемых экспериментально на реальной поверхности (для германия $N_{ss}=1\cdot 10^{11}$ см⁻², для кремния $N_{ss}=1\cdot 10^{12}$ см⁻²).

Теоретические рассмотрения предсказывают возможность существования на реальной поверхности отдельных энергетических уровней ПС, непрерывно распределённых по запрещённой зоне состояний, а также состояний, энергетические уровни которых могут оказаться в разрешённых зонах полупроводника. Экспериментально обнаруживаются как дискретные энергетические уровни ПС в запрещённой зоне, так и квазинепрерывное распределение таких уровней, при котором их плотность в запрещенной зоне полупроводника возрастает по мере приближения к краям разрешённых зон.

Существует несколько типов ПС, различия между которыми связаны с разным временем обмена электронами между поверхностью и объёмом полупроводника. Состояния, для которых время релаксации составляет $1\cdot 10^{-12}\div 1\cdot 10^{-6}$ с, – условно быстрые ПС, а состояния со временем релаксации $1\cdot 10^{-3}$ с и более условно – медленные ПС.

Экспериментальное исследование МДП-структур

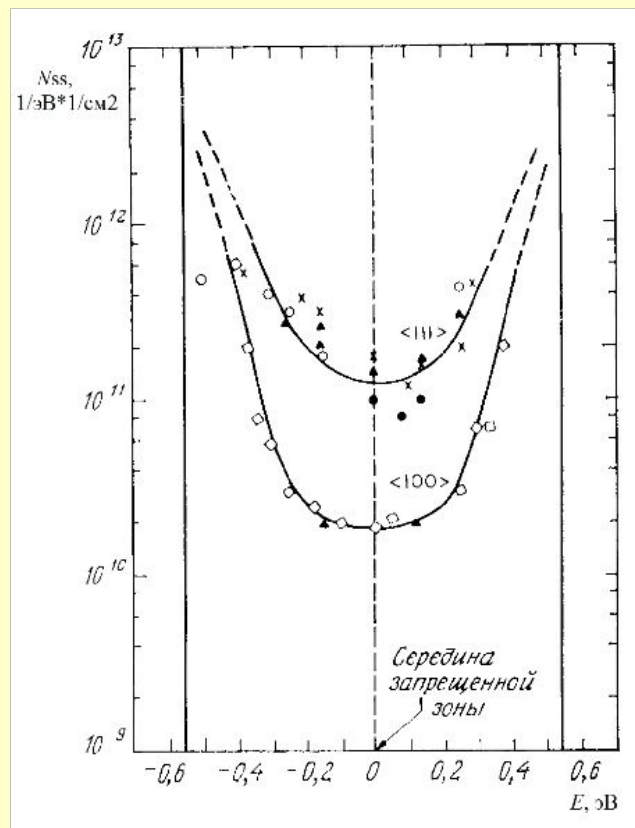
Классификация зарядов в диэлектрике

Для описания ПС был создан ряд теоретических моделей, однако большинство из них констатируют лишь принципиальную возможность существования ПС, в то время как их истинная природа до настоящего времени остается невыясненной. Реальные ПС являются ни чисто таммовскими, ни чисто шоклиевскими. Подтверждением этому является резкое расхождение между предсказанным числом ПС (по Тамму $N_{ss}=1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) и числом ПС, наблюдаемых экспериментально на реальной поверхности (для германия $N_{ss}=1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, для кремния $N_{ss}=1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$).

Плотность ПС на границе Si-SiO₂ ($\sim 1 \cdot 10^{10}$ – $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$) зависит от ориентации поверхности.

Разность работ выхода металла и полупроводника в реальных МДП-структурах

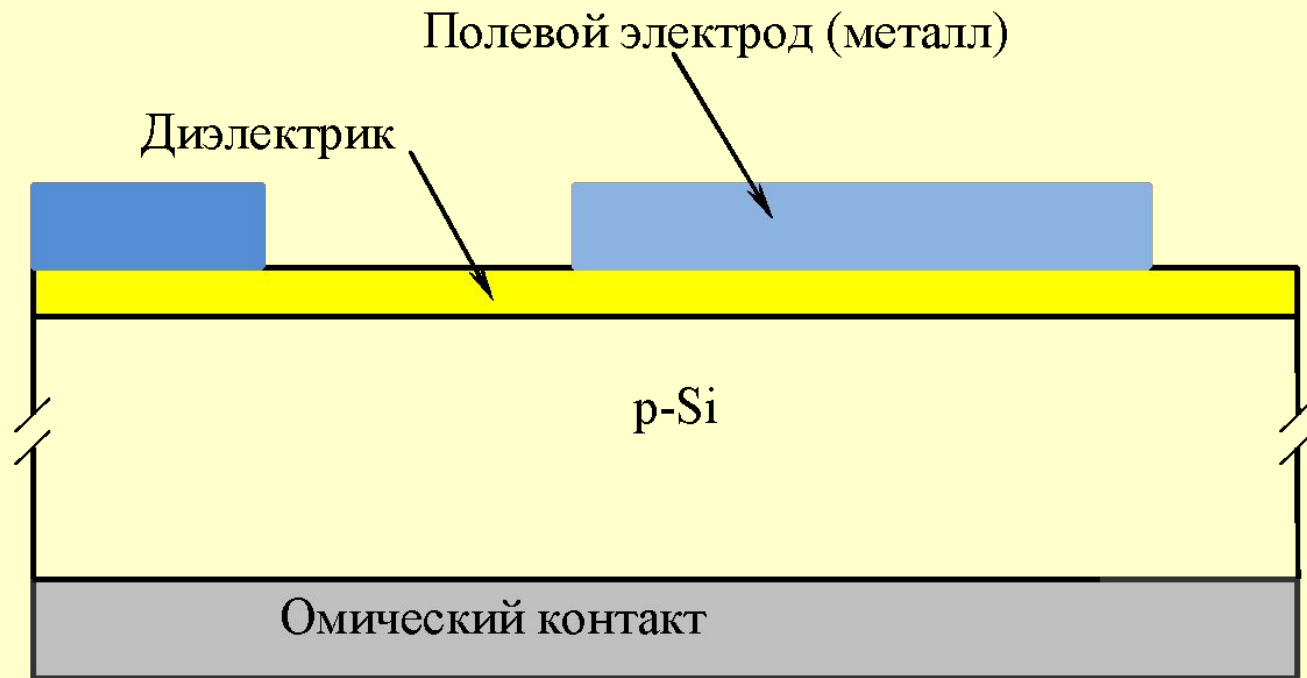
отлична от 0 и определяет наряду с плотностями заряда на сдвиг ВФХ по оси напряжений.



Спектр плотности ПС в МОП структуре

Экспериментальное исследование МДП-структур

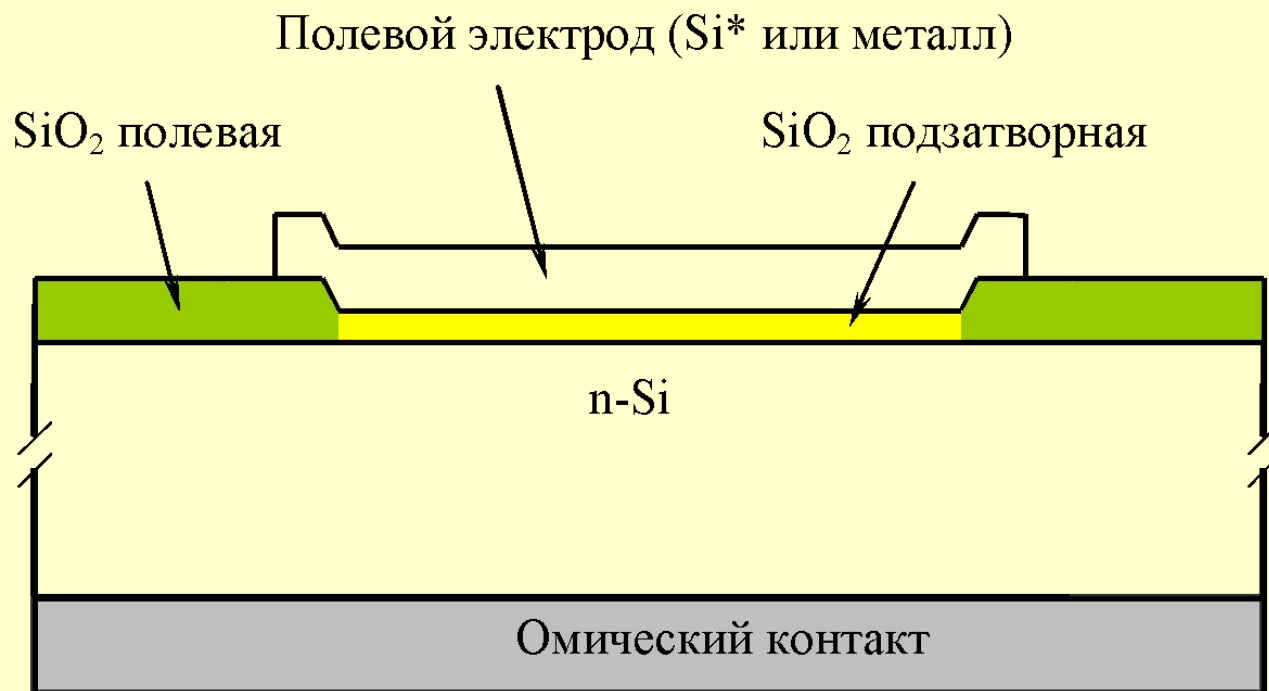
МДП структура с металлическим полевым электродом



Поперечное сечение части контрольной пластины с МДП структурами

Экспериментальное исследование МДП-структур

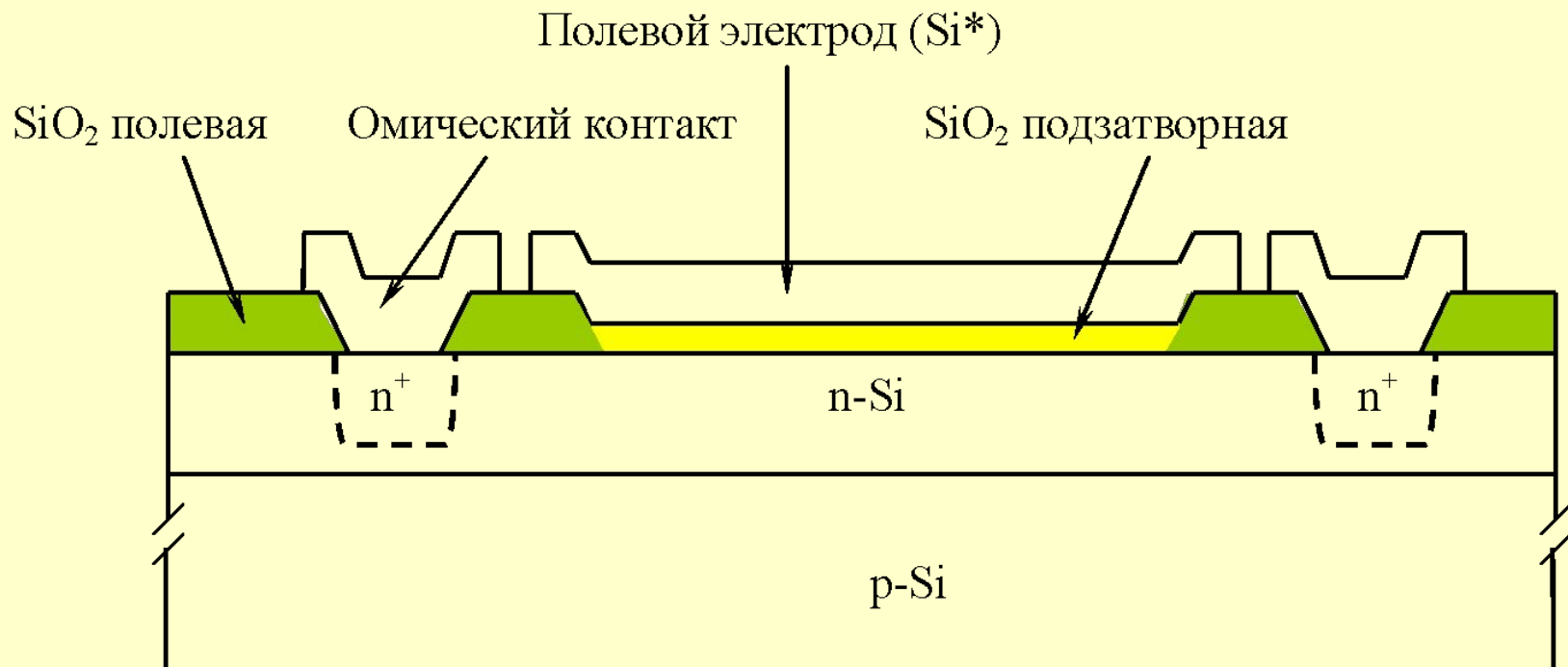
МДП структура с полевым электродом из поликристаллического Si



Поперечное сечение МДП-структуры на основе тонкой подзатворной SiO_2 и изотипной n-подложки (контрольная пластина)

Экспериментальное исследование МДП-структур

МДП структура в тестовом модуле на рабочей пластине



МДП-структура на основе тонкой подзатворной SiO_2 и n -слоя на p -подложке в тестовом модуле на рабочей пластине

Экспериментальное исследование МДП структур

Расчет параметров МДП структуры по ее ВЧ ВФХ

– Тип проводимости полупроводниковой подложки определяют по положению максимальной C_{\max} и минимальной C_{\min} емкости МДП структуры относительно оси напряжений.

– Толщину подзатворного диэлектрика d_i (при известной ε_i) или диэлектрическую проницаемость ε_i (при известной d_i) определяют по измеренному значению емкости

$$C_i = \frac{S\varepsilon_0\varepsilon_i}{d_i} \text{ и известной площади затвора } S, \text{ откуда } d_i = \frac{S\varepsilon_0\varepsilon_i}{C_i} \text{ или } \varepsilon_i = \frac{d_i C_i}{S\varepsilon_0}.$$

– Концентрацию в подложке N_A или N_D определяют, зная $C_{\min} = \frac{C_s^{\min} C_i}{C_s^{\min} + C_i}$,

$$C_s^{\min} = \frac{S\varepsilon_s\varepsilon_0}{W_{\max}} = S \left(\frac{eN_A\varepsilon_s\varepsilon_0}{4\phi_B} \right)^{1/2}, \text{ откуда определяют концентрацию в подложке } N_A \text{ или } N_D.$$

Экспериментальное исследование МДП структур

Расчет параметров МДП структуры по ее ВЧ ВФХ

– Емкость плоских зон C_{fb} . Зная N_A или N_D , вычисляют $L_{Deb} = \sqrt{\frac{\epsilon_s \epsilon_0 kT}{n_0 e^2}}$ и емкость ПЗ

$$C_{fb} = \frac{C_s^{fb} C_i}{C_s^{fb} + C_i}, \text{ учитывая, что } C_s^{fb} = \frac{S \epsilon_0 \epsilon_s}{L_{Deb}} \text{ и } N_A = n_0 \text{ или } N_D = n_0.$$

– Напряжение плоских зон U_{fb} . По C_{fb} определяют напряжение ПЗ U_{fb} при условии $C = C_{fb}$.

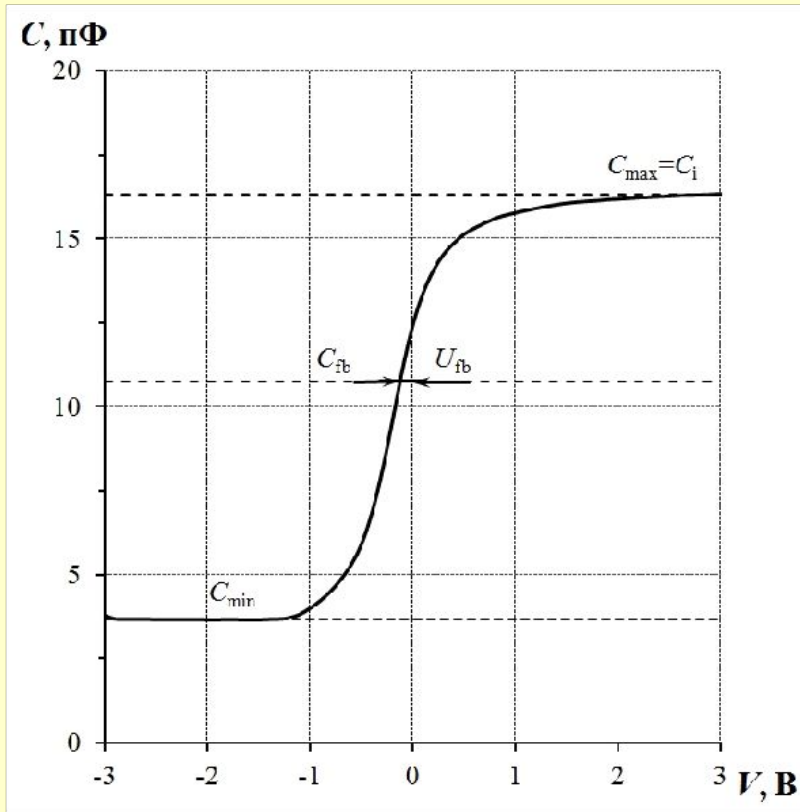
– Эффективная плотность заряда на границе полупроводник-диэлектрик $Q_{ef} = eN_{ef}$

вычисляют зная U_{fb} и C_i . Эффективная плотность заряда $N_{ef} = -\frac{C_i U_{fb}}{S e}$ учитывает

влияние всех зарядов в диэлектрике и разность работ выхода $\Delta\Phi_{ms} = \Phi_m - \Phi_s$.

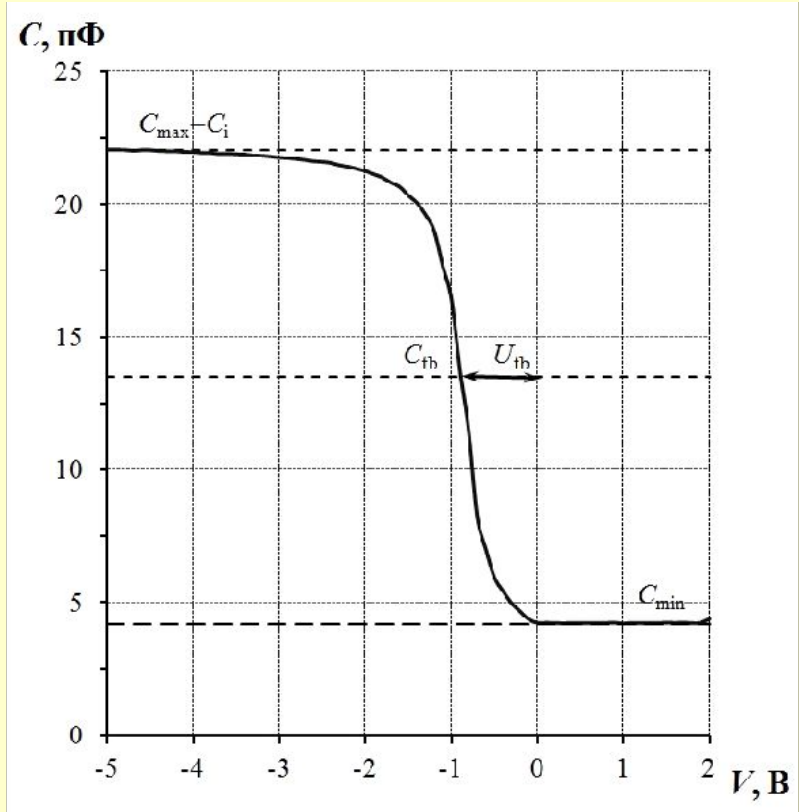
На следующем слайде представлены ВФХ МОП структур на кремниевых подложках разных типов проводимости с площадью полевого электрода $S = 4 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$, а также результаты расчета параметров МОП структур.

Экспериментальное исследование МДП структур



Подложка n-типа,
 $C_{\max} = C_i = 16.3$ пФ,
 $C_{\min} = 3.57$ пФ,
 $d_i = d_{ox} = 82.8$ нм,

$N_D = 1.02 \cdot 10^{15}$ см⁻³,
 $C_{fb} = 10.76$ пФ,
 $U_{fb} = -0.12$ В,
 $N_A = 3.0 \cdot 10^{10}$ см⁻².



Подложка p-типа,
 $C_{\max} = C_i = 22.1$ пФ,
 $C_{\min} = 4.19$ пФ,
 $d_i = d_{ox} = 61.3$ нм,

$N_A = 1.18 \cdot 10^{15}$ см⁻³,
 $C_{fb} = 13.5$ пФ,
 $U_{fb} = -0.89$ В,
 $N_A = 3.1 \cdot 10^{11}$ см⁻².

Экспериментальное исследование МДП-структур

Определение параметров МДП-структуры по высокочастотной ВФХ

Толщину диэлектрика d_i , определяют по измеренному значению максимальной удельной емкости C_i в режиме обогащения, зная ε_i и используя соотношение (14)

$$C_i = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_i}{d_i}.$$

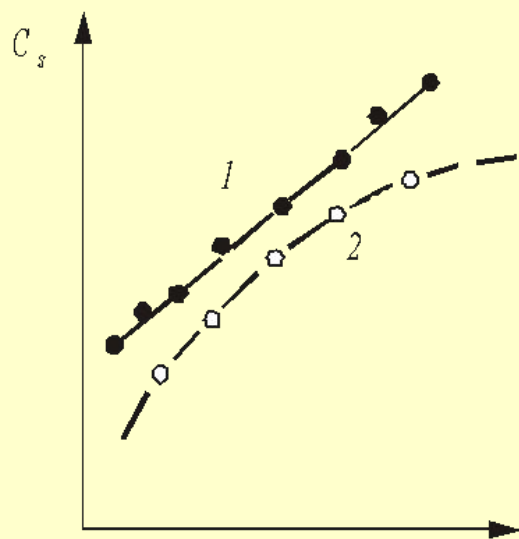


Рис.14. Зависимость C_s^{-2} от φ_s при однородном (1) и неоднородном (2) легировании полупроводника

Соотношения (23) и (16):

$$C_s^{\min} = \frac{\varepsilon_s \varepsilon_0}{W_{\max}} = \left(\frac{e N_D \varepsilon_s \varepsilon_0}{4 \varphi_B} \right)^{1/2} \quad \text{и} \quad C_{\min} = \frac{C_s^{\min} C_i}{C_s^{\min} + C_i}.$$

позволяют по измеренному значению минимальной емкости C^{\min} рассчитать уровень легирования однородно-легированного полупроводника N_D . Также N_D можно определить из производной функции $C_s^{-2} = f(\varphi_s)$ (рис.10, кривая 1), аналогично тому, как это производилось для контакта металл-полупроводник..

Если легирование полупроводника не однородно, то его профиль определяют численным дифференцированием зависимости $C_s^{-2} = f(\varphi_s)$ (рис.10, кривая 2).

Экспериментальное исследование МДП-структур

В самом деле, в режиме обеднения $\varphi_s(W) = \frac{eN_D W^2}{2\varepsilon_s \varepsilon_0}$ и $C_s = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s}{W}$. Поэтому

$$\varphi_s = \frac{eN_D \varepsilon_0 \varepsilon_s}{2C_s^2} \text{ и}$$

$$\frac{d\left(\frac{1}{C_s^2}\right)}{d\varphi_s} = \frac{e}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_s N_D(W), \quad (25)$$

где $N_D(W)$ - уровень легирования на границе ОПЗ толщиной W . Величина W определяется значением $C_s(\varphi_s)$.

При стационарном внешнем напряжении профиль легирования удастся установить только в режиме обеднения, когда зарядом неосновных носителей можно пренебречь. Эта область ограничена величиной W_{\max} . Для определения $N_D(W)$ на бóльшей глубине необходимо использовать импульсное или пилообразное смещение, быстро меняющееся со временем, чтобы за время его действия не успевал формироваться инверсионный слой. При нестационарном обеднении длительность импульса смещения составляет (0,2 – 6) мс, частота измерительного сигнала $f \geq (100 - 500)$ кГц, амплитуда сигнала ~ 15 мВ (см. рис.4.6, импульсное смещение).

Экспериментальное исследование МДП-структур

Использование метода высокочастотных $C-V$ характеристик предполагает, что вкладом ПС в измеряемую дифференциальную емкость C можно пренебречь. Время отклика ПС, расположенных вблизи середины запрещенной зоны, при $T = 300$ К составляет порядка $(1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-5})$ с. Поэтому частота измерительного сигнала должна быть не меньше 1 МГц. Время отклика ПС вблизи краев запрещенной зоны равно $(1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-8})$ с, частота сигнала должна быть еще выше.

Измерение профиля легирования вблизи от поверхности полупроводника методом $C-V$ характеристик контакта металл - полупроводник требует приложения прямого смещения, что приводит к протеканию прямого тока и, соответственно, снижению добротности структуры и увеличению погрешности измерений. При использовании метода ВЧ ВФХ МДП-структур профиль $N_D(x)$ или $N_A(x)$ удается найти в непосредственной близости от границы раздела диэлектрик - полупроводник (Д-П), а также при более высоких уровнях легирования, чем в контактах Шоттки.

Экспериментальное исследование МДП-структур

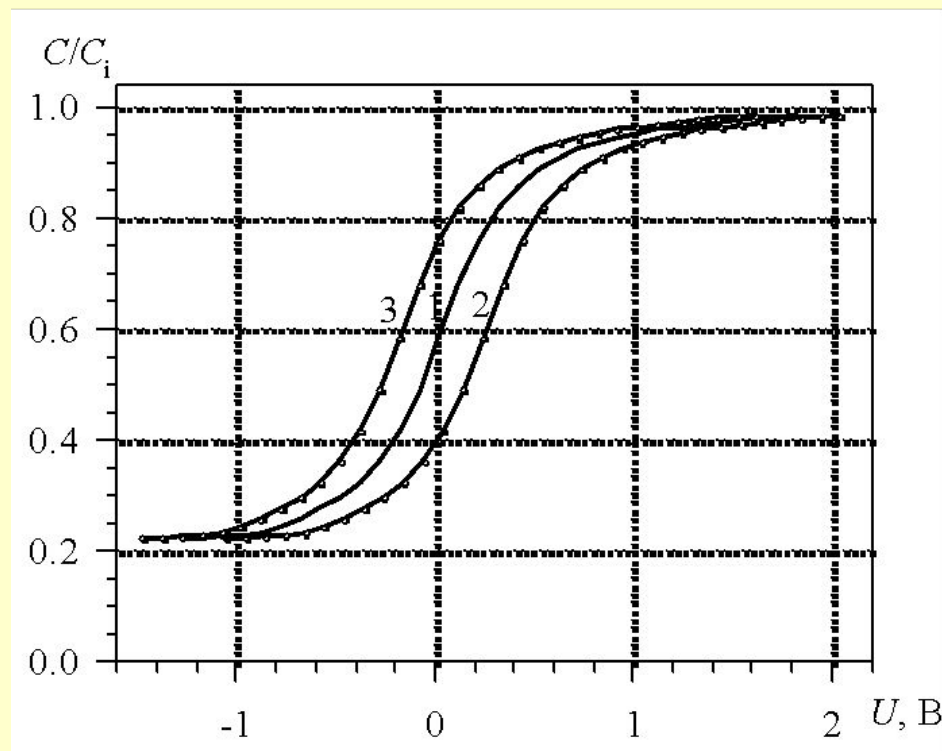


Рис.15. ВФХ МДП-структур на подложке n-типа проводимости: 1 - идеальная, 2 – $\Phi_M > \Phi_S$, 3 – $\Phi_M < \Phi_S$

Эффективную плотность заряда в диэлектрике можно определить, сравнив ВФХ идеальной МОП-структуры и экспериментальную C-V характеристику. Если сдвиг этих кривых эквидистантен, значит, в диэлектрике присутствует встроенный заряд, величина которого не зависит от поверхностного потенциала ϕ_s (или) разность работ выхода из металла и полупроводника не равна нулю.

Сдвиг ВФХ по оси напряжений также может быть вызван разностью работ выхода материалов подложки и металла полевого электрода.

На рис.15 представлены ВФХ МОП-структур на n-подложке: идеальной МОП-структуры (1), МОП-структуры с $\Phi_m > \Phi_s$ (2) и МОП структуры с $\Phi_M < \Phi_S$ (3).

Экспериментальное исследование МДП-структур

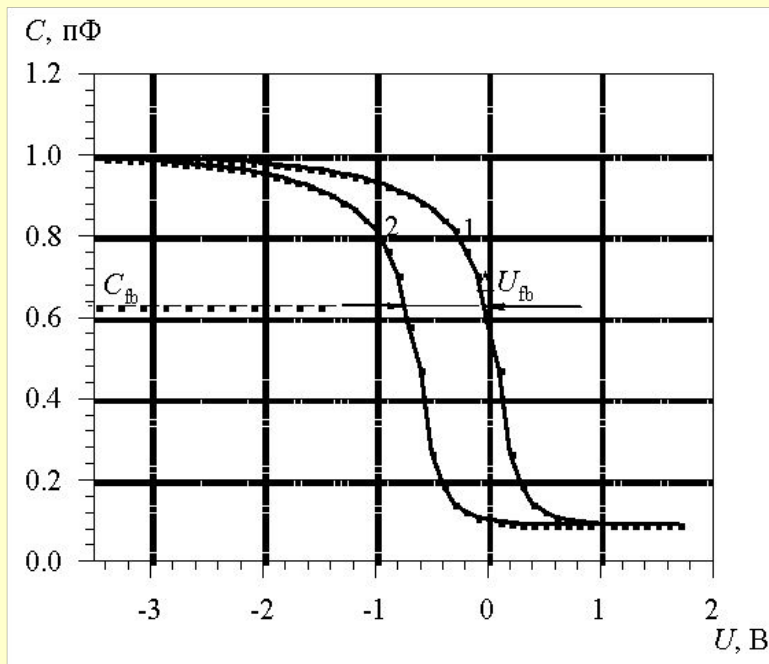


Рис.16. ВФХ МДП-структур на подложке р-типа проводимости: 1 - идеальная, 2 – со встроенным положительным зарядом

На рис.16 представлены ВФХ идеальной МОП-структуры (1) и ВФХ МОП-структуры с положительным зарядом в подзатворной двуокиси кремния (2).

Напряжение плоских зон U_{fb} находят как напряжение, при котором $C_{МДП} = C_{fb}$.

По значению U_{fb} и удельной емкости МДП-структуры в режиме обогащения C_i (или d_i) вычисляют эффективную плотность заряда на границе полупроводник-диэлектрик.

$$N_{eff} = -\frac{C_i U_{fb}}{e}. \quad (26)$$

С помощью табличных данных для работ выхода из металла Φ_m и полупроводника Φ_s по значению напряжения плоских зон U_{fb} для

можно найти величину плотности заряда в диэлектрике, приведенную к границе раздела Д-П

$$N_0 = \frac{Q_0}{e}.$$

$$N_0 = \frac{C_i}{e} \left(\frac{\Phi_m - \Phi_s}{e} - U_{fb} \right). \quad (27)$$

Экспериментальное исследование МДП-структур

Измерение N_m . Термополевые испытания

Для определения плотности подвижного заряда Q_m в диэлектрике проводят (ТПО) МДП-структуры, то есть подвергают ее воздействию повышенной температуры электрического поля. Алгоритм ТПО следующий.

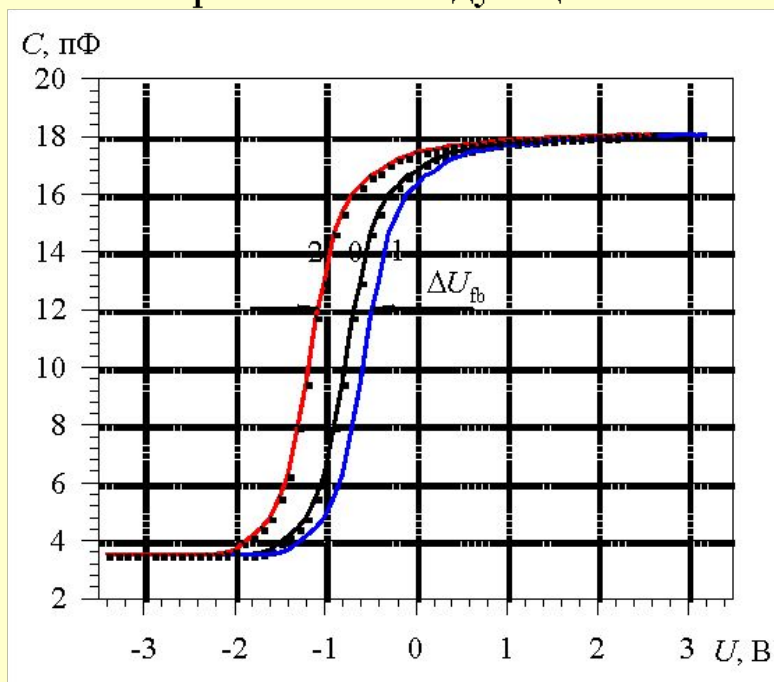


Рис.17. ВФХ МОП структуры: 0 – исходная, 1 – после отрицательной ТПО, 2 – после положительной ТПО

- 1) Измеряют ВФХ МДП-структуры при комнатной температуре ($T=20^\circ\text{C}$).
- 2) Нагревают пластину с МДП-структурами ($150^\circ\text{C} - 300^\circ\text{C}$) при отрицательном положительном напряжении на полевом электроде ($E_i \approx (1 - 3) \cdot 10^5 \text{ В/см}$).
- 3) Охлаждают пластину до комнатной температуры при том же значении напряженности электрического поля, снимают приложенное напряжение и измеряют ВФХ.
- 4) Нагревают пластину с МДП-структурами ($150^\circ\text{C} - 300^\circ\text{C}$) при о положительном напряжении на полевом электроде ($E_i \approx (1 - 3) \cdot 10^5 \text{ В/см}$).
- 5) Охлаждают пластину до 20°C при том же значении напряженности электрического поля, снимают приложенное напряжение и измеряют ВФХ.

Величину Q_m находят по сдвигу ΔU_{fb} до и после термополевых испытаний.

Экспериментальное исследование МДП-структур

Измерение N_m . Метод ДВАХ при повышенной температуре

Метод ДВАХ МДП структур при повышенной температуре основан на измерении тока смещения I , возникающего при приложении к МДП-структуре линейно изменяющегося во времени напряжения при повышенной постоянной температуре пластины с МДП-структурами ($T=150 - 400$ °С). При комнатной температуре ток смещения I по определению

$$I = I_C = m \cdot C(U),$$

где $m = \text{const}$ - скорость изменения напряжения на МДП-структуре; $m=0.05 - 0.1$ В/с.

В областях сильного обогащения и сильной инверсии емкостной ток не зависит от напряжения, так как емкость МДП-структуры постоянна и равна емкости диэлектрического слоя. В областях обеднения, слабого обогащения и слабой инверсии МДП-емкость зависит от напряжения. В этом случае ДВАХ представляет собой квазистатическую вольт-фарадную характеристику МДП структуры, так как $C(U) \sim I_C(U)$.

Наличие подвижных зарядов в диэлектрическом слое существенно изменяет ДВАХ. При повышенной температуре ($T=250$ °С) происходит генерация подвижных ионов с ловушек и увеличивается их подвижность в диэлектрике.

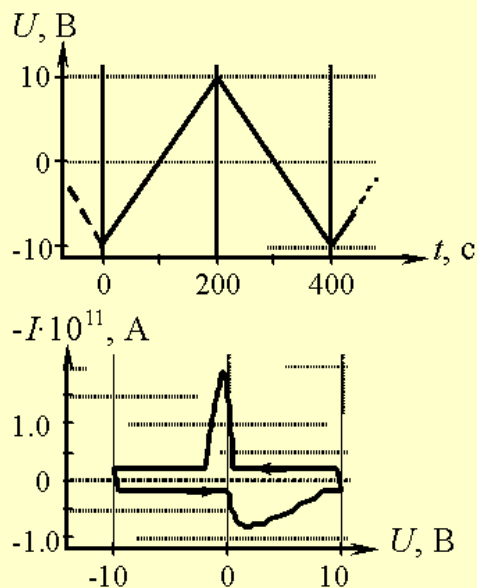
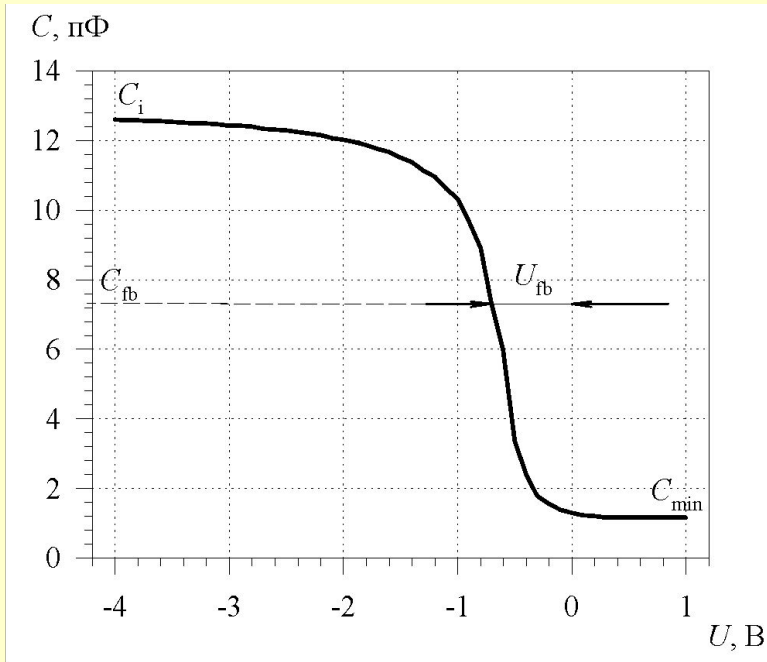


Рис. . Напряжение на МДП-структуре (а),
Ток смещения через МДП-структуру (б)

Экспериментальное исследование МДП структур

Расчет параметров МДП структуры по ее ВЧ ВФХ



Высокочастотная вольтфарадная характеристика структуры Al-SiO₂-p-Si

$$C_i = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_i}{d_i}, \text{ откуда } d_i = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_i}{C_i} \text{ при известной } \varepsilon_i \text{ или}$$

$$\varepsilon_i = \frac{d_i C_i}{\varepsilon_0} \text{ при известной } d_i.$$

$$C_{\min} = \frac{C_s^{\min} C_i}{C_s^{\min} + C_i}, \quad C_s^{\min} = \frac{\varepsilon_s \varepsilon_0}{W_{\max}} = \left(\frac{e N_A \varepsilon_s \varepsilon_0}{4 \phi_B} \right)^{1/2}, \text{ откуда}$$

определяют концентрацию в подложке N_A .

Зная N_A , вычисляют $L_{\text{Деб}} = \sqrt{\frac{\varepsilon_s \varepsilon_0 kT}{n_0 e^2}}$ и емкость ПЗ

$$C_{fb} = \frac{C_s^{fb} C_i}{C_s^{fb} + C_i}, \text{ учитывая, что } C_s^{fb} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s}{L_{\text{Деб}}} \text{ и } N_A = n_0.$$

По C_{fb} определяют напряжение ПЗ U_{fb} при условии $C = C_{fb}$.

Эффективная плотность заряда $N_{ef} = -\frac{C_i U_{fb}}{e}$

учитывает влияние всех зарядов в диэлектрике и разность работ выхода $\Delta \Phi_{ms} = \Phi_m - \Phi_s$

Экспериментальное исследование МДП-структур

Измерение N_m . Метод ДВАХ при повышенной температуре

Проводимость диэлектрического слоя во время переноса ионов от одной границы диэлектрика к другой увеличивается, и полный ток смещения МДП-емкости I становится равным

$$I(U) = I_c(U) + I_D(U),$$

где I_D – ток смещения в результате дрейфа подвижных ионов в диэлектрике.

На ДВАХ появляются всплески ионного тока, ассимметричные относительно осей координат.

Подвижный заряд, перенесенный в слое двуокиси кремния от границы Si-SiO₂ к границе SiO₂-Me пропорционален интегралу дрейфового тока I_D , то есть площади под максимумом на ДВАХ.

Плотность подвижного заряда определяется по следующей формуле

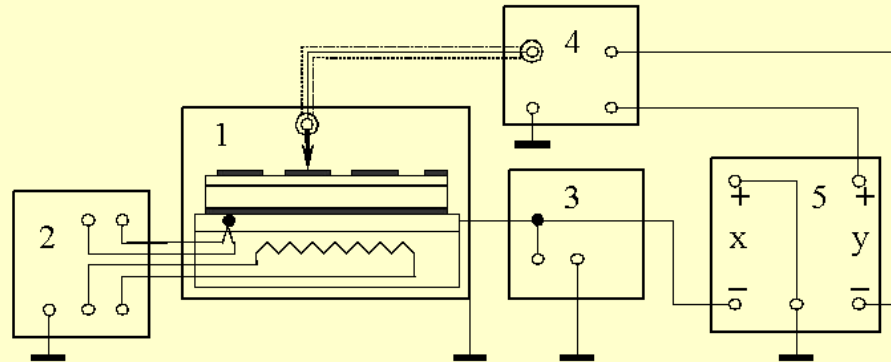
$$N_m = \frac{m}{eS} \int_{t_1}^{t_2} I_D(t) dt = \frac{m}{eS} \int_{-U_0}^{U_0} [I(U) - I_c(U)] dU,$$

где $e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ Кл - абсолютная величина заряда электрона; S - площадь полевого электрода.

Блок-схема установки измерения ДВАХ МДП-структур при повышенной температуре представлена на рисунке.

Экспериментальное исследование МДП-структур

Измерение N_m . Метод ДВАХ при повышенной температуре



Блок-схема установки измерения ДВАХ МДП-структур при повышенной температуре

1 – измерительная камера с нагреваемым термостатируемым столом; терморегулятор, 3 – генератор сигналов специальной формы, 4 – измеритель малых токов, 5 – графопостроитель.

Объектом измерения служат кремниевые пластины с двуокисью кремния (или другим диэлектриком) на лицевой стороне пластины и с полевыми электродами из металла или поликристаллического кремния, созданными на поверхности контролируемого диэлектрика методами вакуумного напыления (или осаждения из газовой фазы) и последующей фотолитографии. Наличие омического контакта к обратной стороне пластины не обязательно. Площадь полевых электродов составляет от $1 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ до $1 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$.

Экспериментальное исследование МДП-структур



Рис.20. MDC Model 490 «QuietCHUCK DC Hot Chuck System» предназначена для использования с автоматизированными измерителями а С-V характеристик МДП-структур для быстрого и эффективного измерения плотности подвижного заряда двумя методами: ВЧ ВФХ и ТПО МДП-структур и ДВАХ МДП-структур

Экспериментальное исследование МДП-структур

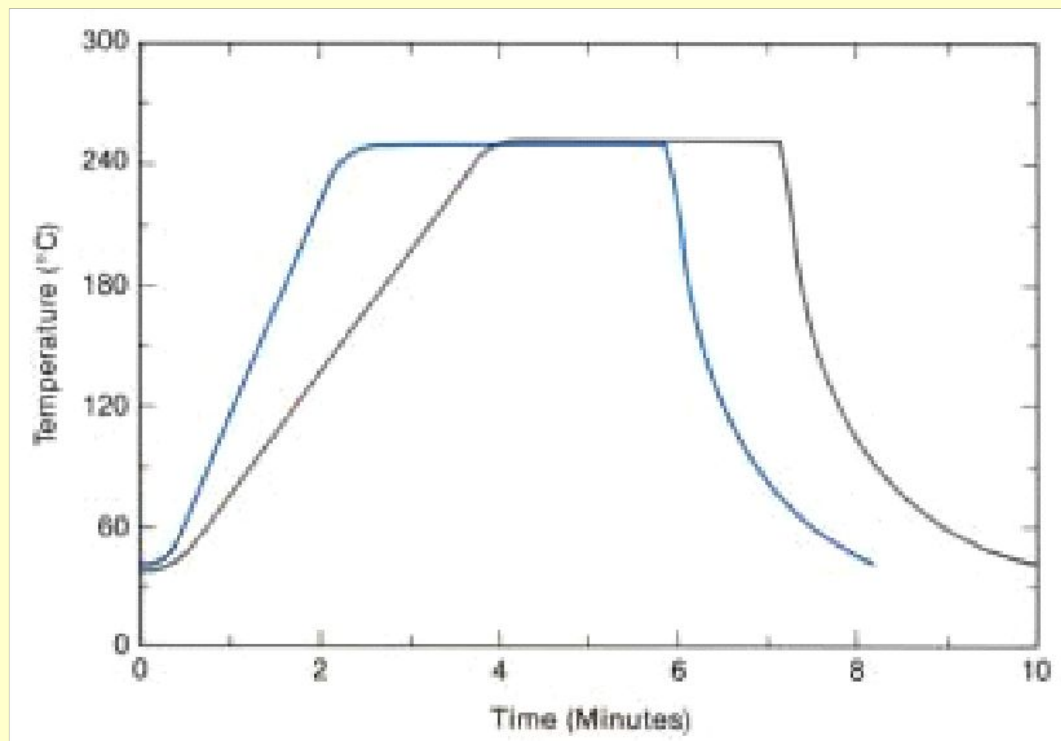


Рис.21. Типичный цикл изменения температуры для столов диаметром 100 мм (синяя линия) и 150мм (серая линия)

MDC Model 490 «QuietCHUCK DC Hot Chuck System»

- Быстро нагреваемый и охлаждаемый стол в измерительной темновой камере.
- Контроллер температуры.
- Возможность использования до 4-х зондов.
- Программируемый источник напряжения для стресса.
- Охлаждение водой.
- Точность поддержания и измерения температуры ± 1 °C в диапазоне от 15°C до 400°C
- Интерфейс RS-232.
- Две модели с разными диаметрами стола для пластин 100 мм, и 150 мм.

Экспериментальное исследование МДП-структур

MDC Model 8512 «DuoChuck» предназначена для использования с автоматизированными измерителями C-V характеристик МДП-структур для быстрого и эффективного измерения плотности подвижного заряда методом ВЧ ВФХ и ТПО.



Рис.22. MDC Model 8512 «DuoChuck»

- Два нагреваемых стола в темновой камере.
- Интегрированный контроллер.
- Возможность использования до 10-ти зондов.
- Два программируемых источника напряжения для стресса.
- Охлаждение водой.
- Точность поддержания и измерения температуры ± 1 °С в диапазоне от 15°С до 300°С
- Интерфейс RS-232.
- Model 8512-6: диаметр стола- 165 мм, время нагрева/охлаждения – 320 с / 225 с.
- Model 8512-8: диаметр стола – 218 мм, время нагрева/охлаждения – 400 с / 500 с.
-

Экспериментальное исследование МДП-структур

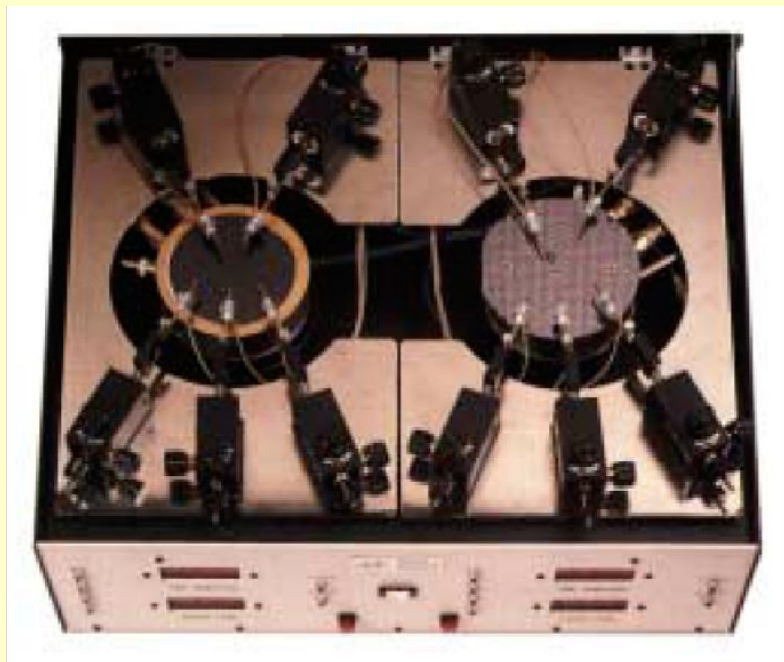


Рис.23 MDC Model 8512 «DuoChuck» (измерительная темновая камера с открытой крышкой)



Рис.24 MDC Model 8512 «DuoChuck» с измерителем ВФХ