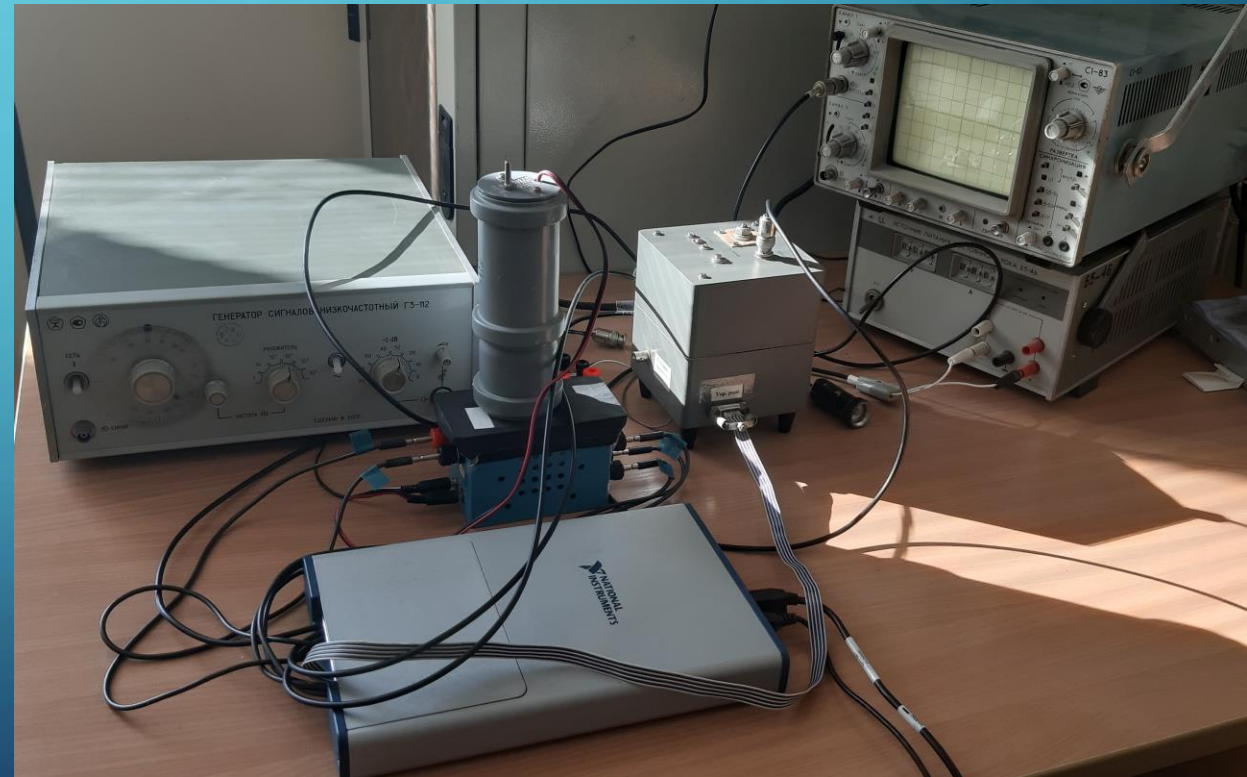


ИССЛЕДОВАНИЕ ВФХ МДП-СТРУКТУР

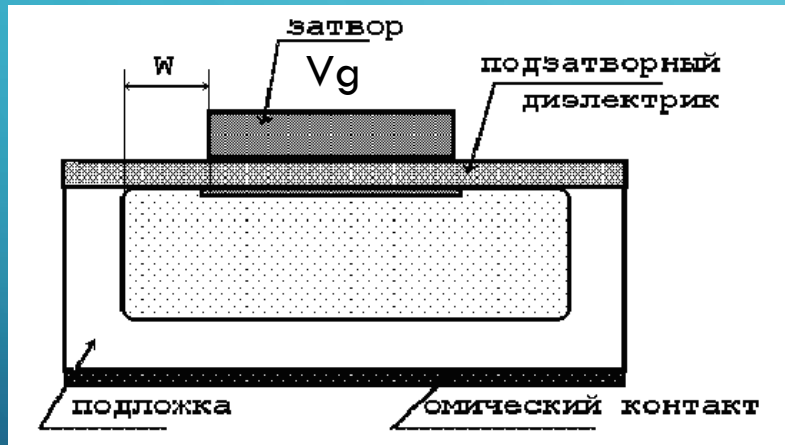
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ



РАБОТА №1

Цели работы:

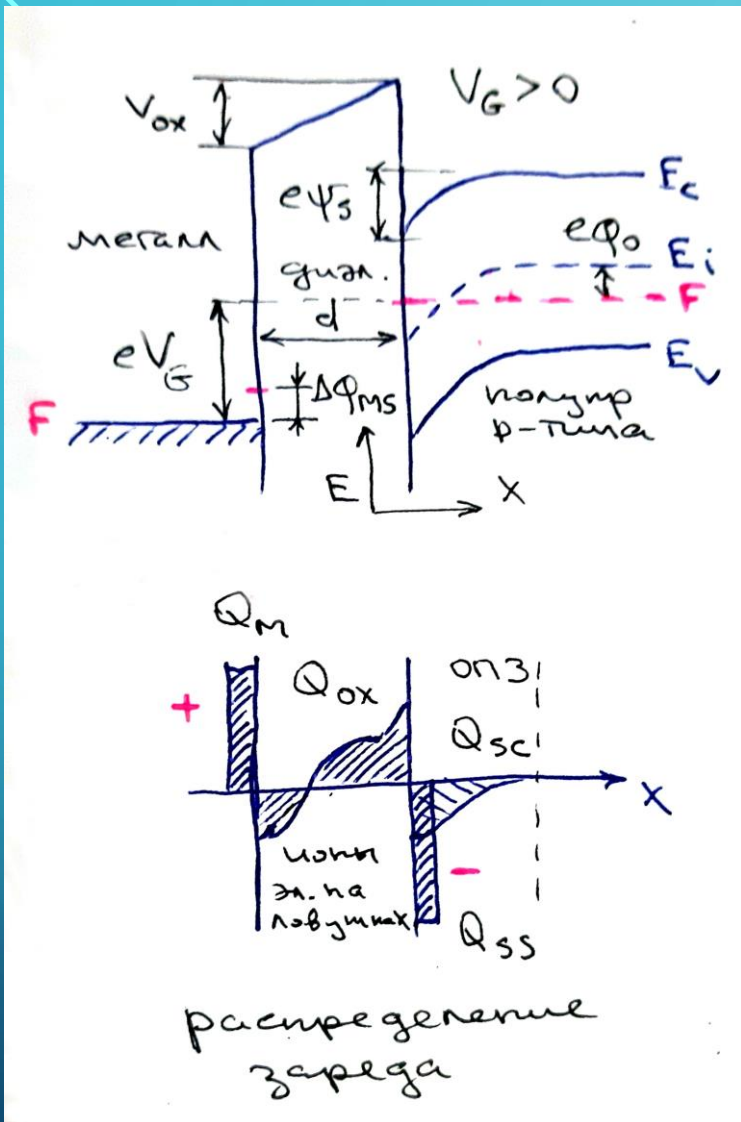
- Измерить равновесную высокочастотную вольт-фарадную характеристику структуры «металл-диэлектрик-полупроводник» в режиме удалённого доступа к измерительной установке.
- По результатам измерений определить параметры МДП-структуры: тип канала, толщину диэлектрика, уровень легирования, встроенный заряд в диэлектрике, плотность поверхностных состояний.



Заготовка МДП-транзистора

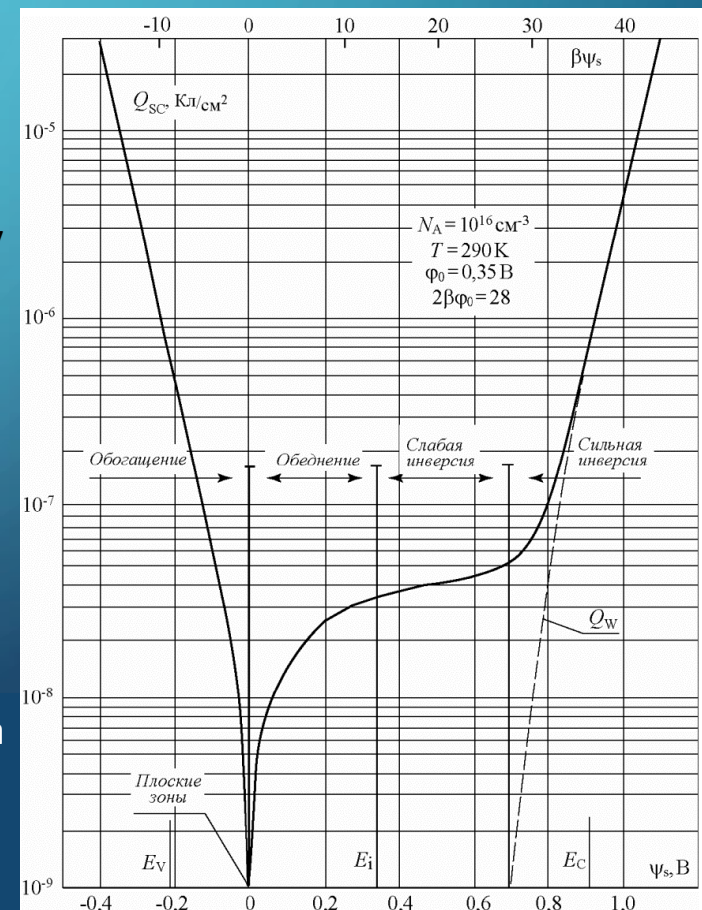
При приложении напряжения к затвору V_g (относительно подложки) электрическое поле проникает через тонкую диэлектрическую пленку в полупроводник, где создает область пространственного заряда (ОПЗ). Такое явление называется эффектом поля. В зависимости от знака и величины V_g может реализоваться четыре энергетических состояния приповерхностной области полупроводника: обогащение, обеднение, слабая инверсия и сильная инверсия.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ДИАГРАММЫ МДП-СТРУКТУРЫ



Примем для основу для анализа полупроводник p-типа:

- Область обогащения ($\psi_s < 0$). Заряд в ОПЗ Q_{sc} обусловлен зарядом свободных дырок Q_p , как только $\psi_s > \frac{kT}{q}$.
- Потенциал плоских зон $\psi_s = 0$.
- Область обеднения ($\phi_0 > \psi_s > 0$). Заряд в ОПЗ Q_{sc} обусловлен только зарядом ионизованных акцепторов Q_B .
- Область слабой инверсии ($2\phi_0 > \psi_s > \phi_0$). Заряд в ОПЗ Q_{sc} , также как и в случае обеднения, обусловлен только зарядом ионизованных акцепторов Q_B , поскольку заряд свободных электронов $Q_n \ll Q_B$.
- Пороговое напряжение $\psi_s = 2\phi_0$.
- Область сильной инверсии ($\psi_s > 2\phi_0$). Заряд в ОПЗ Q_{sc} обусловлен в основном зарядом свободных электронов вблизи поверхности в инверсионном канале Q_n .



Энергетическая зонная диаграмма для идеальной МДП-структуры в поперечном сечении канала в состоянии инверсии: F – энергия уровня Ферми, E_c – энергия дна зоны проводимости, E_v – энергия потолка валентной зоны, E_i – положение уровня Ферми в собственном полупроводнике, ψ_s – потенциал на поверхности полупроводника, $\phi_0 = F - E_i$, e – заряд электрона.

ПОВЕРХНОСТНЫЕ СОСТОЯНИЯ

Одной из важных особенностей полупроводников является существенная зависимость их электрических и оптических свойств от состояния поверхности полупроводника (как вариант – от состояния границы раздела "полупроводник-диэлектрик"). Общая причина кроется в том, что вблизи поверхности как макроскопического дефекта возникают дополнительные **поверхностные электронные состояния** (ПС), которые могут существенно изменить структуру энергетических зон в приповерхностной области.

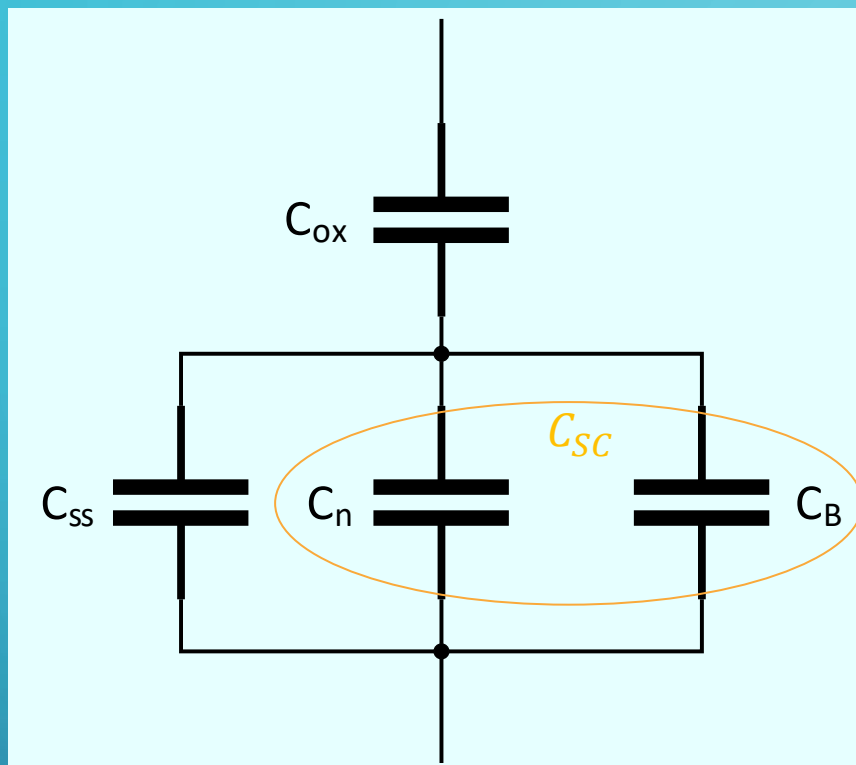
Модель Тамма объясняет причину возникновения ПС обрывом периодического потенциала кристалла на поверхности. Теоретические расчёты по этой модели приводят к величине концентрации ПС $\sim 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Модель Шокли объясняет наличие ПС локализованными на поверхности свободными атомными орбиталями. Их концентрация – порядка концентрации поверхностных атомов. Кроме того, дополнительно к ним возможны и весьма вероятны ПС **адсорбционного происхождения**.

Донорные ПС положительно заряжены, если расположены выше уровня Ферми, и нейтральны, если находятся ниже.

Акцепторные ПС нейтральны, если расположены выше уровня Ферми, и отрицательно заряжены, если находятся ниже. Обычно находятся в верхней половине запрещённой зоны.

ПС характеризуются энергетической плотностью $N_{ss}(E)$ – т.е. плотностью состояний на единичный энергетический интервал [$\text{см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$], а также величиной поверхностной плотности заряда $Q_{ss}(\psi_s)$ (обычно кратко именуемую "зарядом") [$\text{Кл} \cdot \text{см}^{-2}$].

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ



$$V_g = V_{ox} + \psi_s + \Delta\varphi_{MS}$$

Знак поверхностного потенциала соответствует знаку напряжения на затворе.

$$Q_M + Q_{SC} + Q_{SS} + Q_{ox} = 0$$

Уравнение электронейтральности.

$$C_{ox} = \frac{Q_M}{V_{ox}} \quad \text{- есть геометрическая ёмкость диэлектрика.}$$

$$C_{SC} = \left| \frac{dQ_{SC}}{d\psi_s} \right| \quad C_{SS} = \left| \frac{dQ_{SS}}{d\psi_s} \right|$$

- дифференциальные ёмкости.

полная ёмкость МДП-структуры:

$$C = \frac{dQ_M}{dV_g} = C_{ox} \left(1 - \frac{C_{ox}}{C_{ox} + C_{SC} + C_{SS}} \right)$$

или

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{SC} + C_{SS}}$$

C_n - ёмкость неосновных носителей

C_p - ёмкость основных носителей

C_B - ёмкость связанных зарядов

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ВФХ

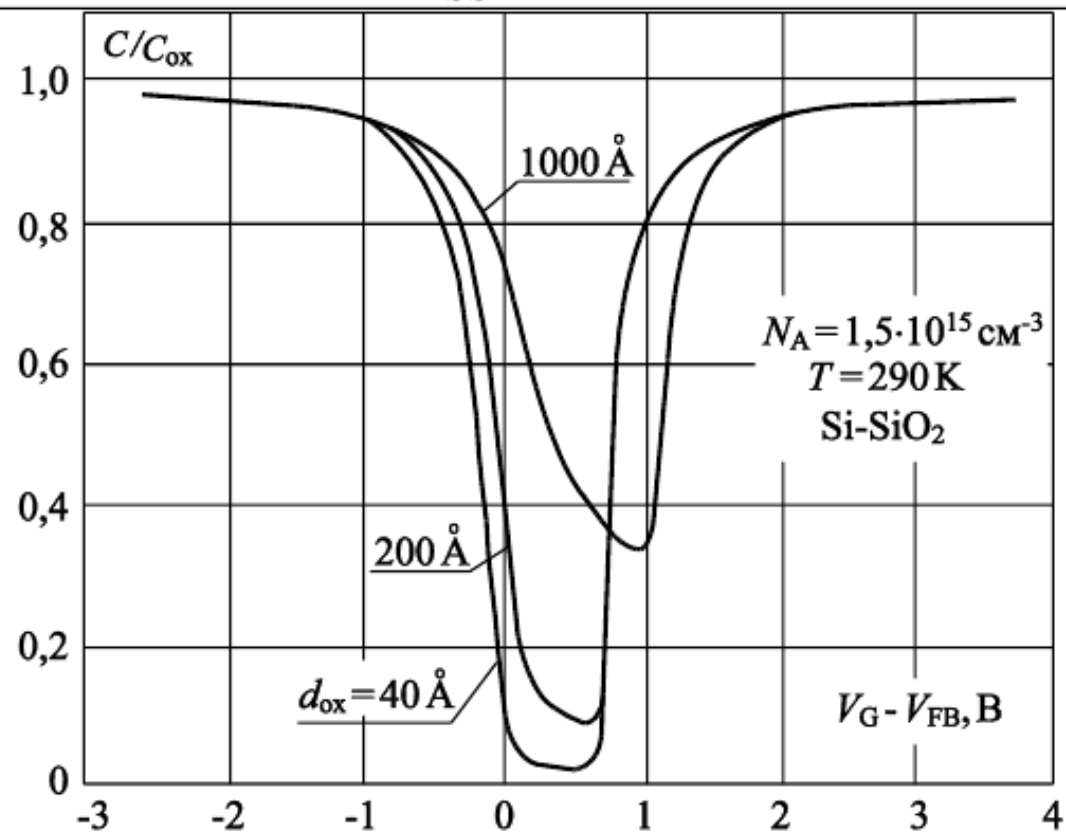
В экспериментах по измерению ёмкости МДП-структуры важное значение имеет частота измерительного сигнала, поскольку изменение заряда Q_{SC} в области инверсии есть достаточно медленный генерационно-рекомбинационный процесс со временем жизни неосновных носителей τ_{SC} , а захват носителей на поверхностные ловушки и выброс с них также происходят достаточно медленно и характеризуются постоянной времени τ_{SS} этих состояний.

Пусть период измерительного сигнала будет существенно больше τ_{SC} и τ_{SS} . Обычно используют линейно изменяющееся напряжение с периодом в сотни секунд $U(t) = \alpha t$. В таком случае полная ёмкость МДП-структуры будет определяться выражением $C = \left(\frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{SC} + C_{SS}} \right)^{-1}$.



$$i = \frac{dQ}{dt} = \frac{dQ}{dU} \frac{dU}{dt} = C(U) \cdot \alpha \quad C(U) = \frac{\alpha}{i}$$

Чем меньше скорость изменения напряжения – тем меньше ток.
В реальных экспериментах приходится измерять токи от 10^{-8} до 10^{-14} А.

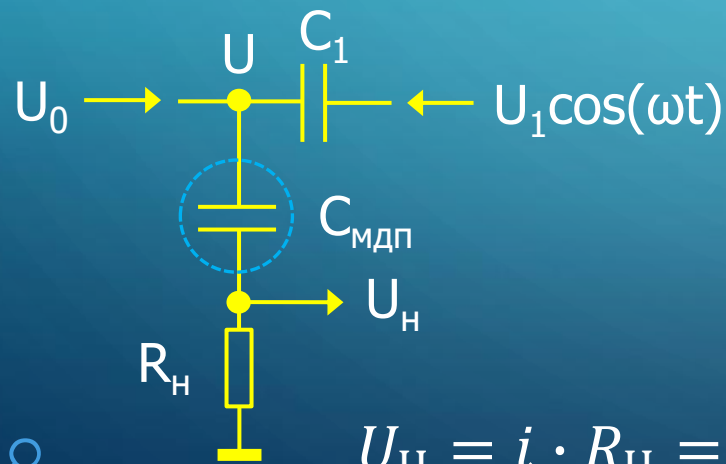


Равновесные $C-V$ характеристики идеальных МДП-структур на кремнии p -типа с различной толщиной подзатворного диэлектрика

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВФХ

Суть метода заключается в приложении к МДП-структуре медленно меняющегося напряжения V_{gr} , которое постепенно смещает поверхностный потенциал из состояния обогащения в состояние с сильной инверсией (как и для НЧ ВФХ). Однако при этом V_{gr} модулируется относительно высокочастотным синусоидальным напряжением малой амплитуды (меньше 0.1 В). Период этого сигнала существенно меньше времени жизни неосновных носителей заряда τ_{SC} и времени перезарядки поверхностных состояний τ_{SS} . При таких условиях заряд в инверсионном канале не успевает следовать за изменением переменного напряжения, поэтому C_{SS} , и C_n (неосновные) равны нулю. В таком случае полная ёмкость МДП-структуры будет

определяться выражением $C = \left(\frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_p + C_B} \right)^{-1}$.



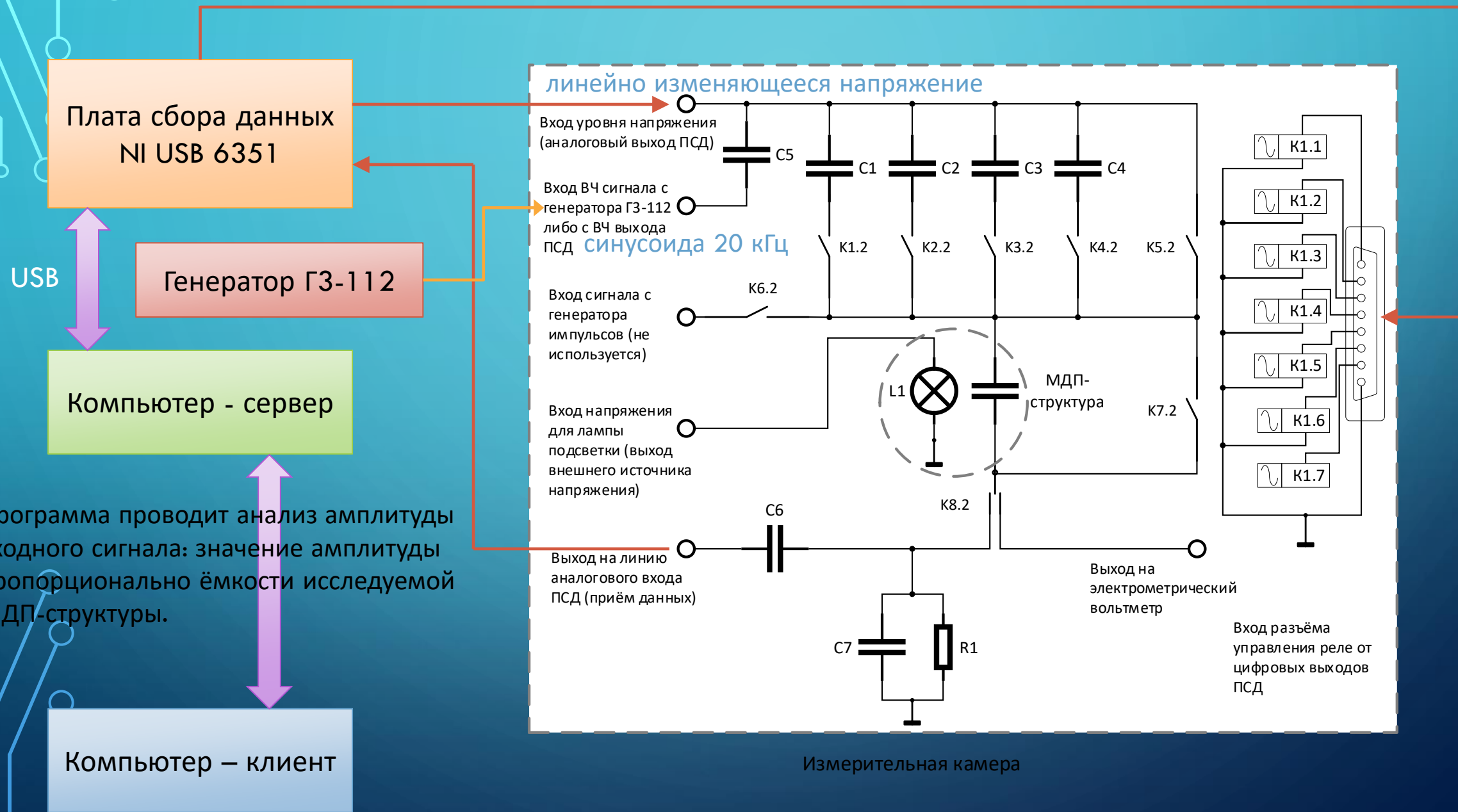
$$i = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R_H^2 + \frac{1}{(\omega C(U))^2}}} \approx \omega C(U) \cdot U$$

$$R_H \ll \frac{1}{\omega C}$$

$$U_H = i \cdot R_H = \omega C(U) \cdot U \cdot R_H$$

$$C(U) = \frac{U_H}{\omega U R_H}$$

СХЕМА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ



Плата сбора данных
NI USB 6351

Генератор ГЗ-112

Компьютер - сервер

Компьютер - клиент

Программа проводит анализ амплитуды входного сигнала: значение амплитуды пропорционально ёмкости исследуемой МДП-структуры.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Исследуются структуры Si-Si₃N₄-Al. На экспериментальной установке для каждого студента устанавливается своё положение контактной иглы, т.е. выбирается своя МДП-структура. Алюминиевая контактная площадка к затвору для каждого транзистора пусть имеет размер 0.03 см x 0.03 см.

Единицы измерения – в процессе расчётов: желательно СИ; в выходных данных: ёмкость – в пФ, потенциал – в В, длина – в см, концентрация – в см⁻³, энергия – в эВ.

Диэлектрическая проницаемость: Si₃N₄ – 6.8, SiO₂ – 3.6, Si – 11.9, значение $\xi_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

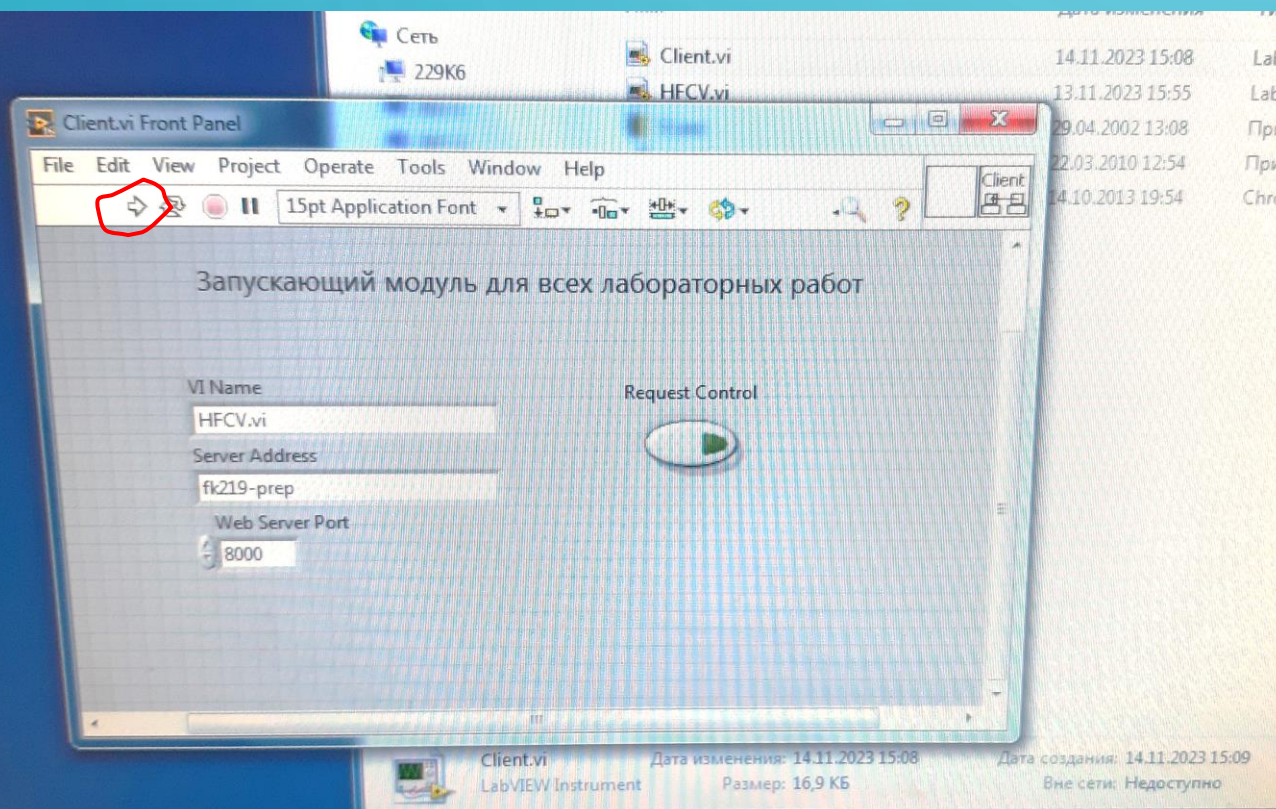
Константы: $e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ Кл, $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ Дж/с, $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, $T = 300$ К, $m_n = 1.08$, $m_p = 0.56$

Из полученных ВАХ следует определить:

- Тип проводимости подложки (n или p)
- Толщину диэлектрика d_{ox} (см)
- Максимальную ширину ОПЗ W_{max} (см)
- Концентрацию легирующей примеси N_b (см⁻³)
- Электрохимический потенциал φ_0 (положение уровня Ферми, В)
- Заряд в окисле Q_{ox} (Кл/см²)
- Энергетическую плотность ПС N_{ss} (см⁻²эВ⁻¹), можно как зависимость $N_{ss}(\psi_s)$

ПОДГОТОВКА К ИЗМЕРЕНИЮ

Программное обеспечения для проведения измерений написано в среде LabView. Для работы с измерительным модулем используется технология удалённого запуска виртуальных инструментов LabView. Серверный инструмент (**lab1.vi**) запускается на компьютере преподавателя. К серверу одновременно может удалённо подключиться только один клиент. Для подключения на студенческом компьютере следует открыть инструмент **client.vi**. Его можно найти в сетевой папке \\fk219-prep\FDP. Это универсальный стартовый модуль, который следует запустить для соединения с сервером, предварительно правильно указав параметры соединения.

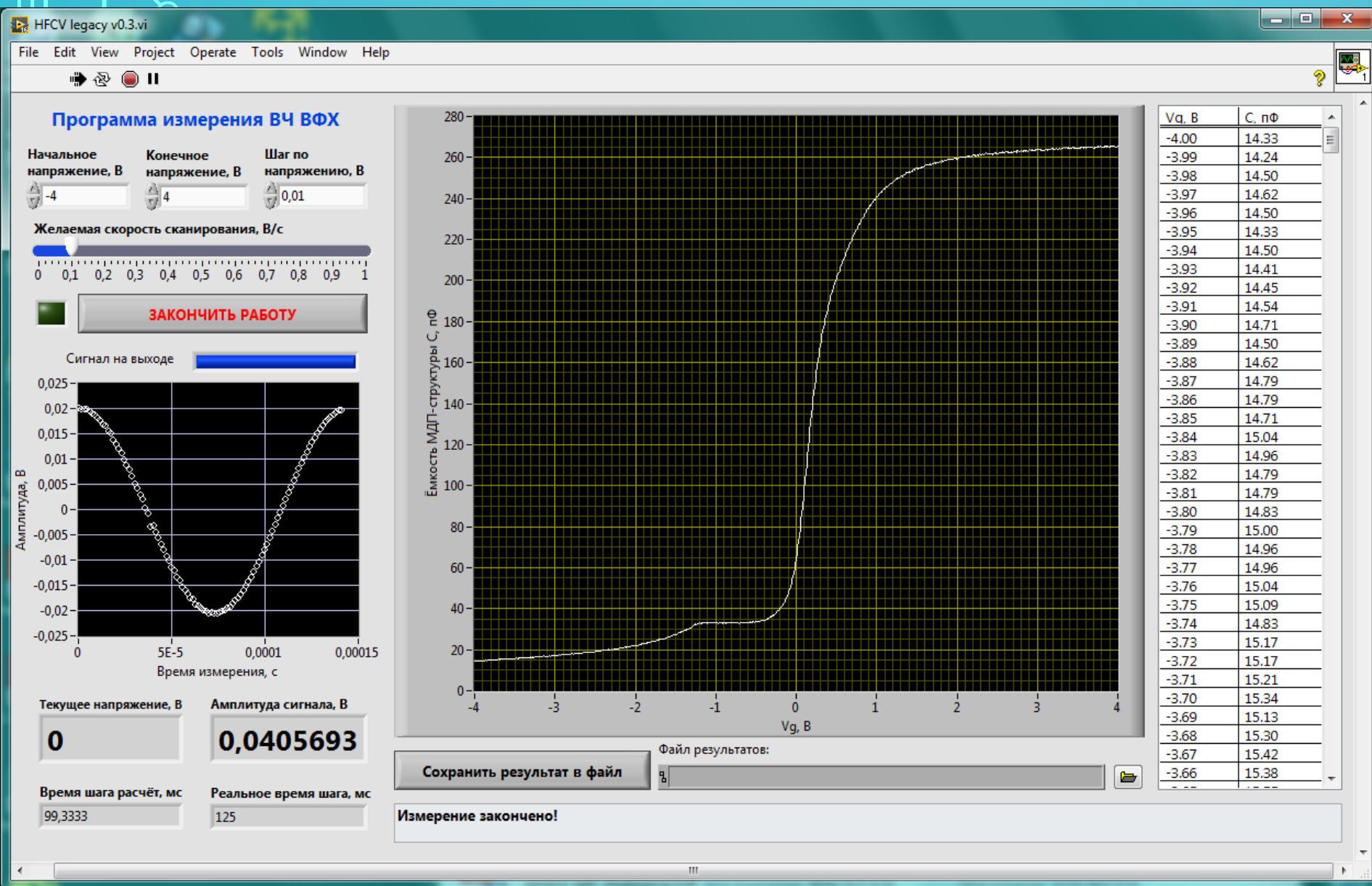


В поле VI Name укажите **HFCV.vi**. Указанный инструмент должен находиться в том же каталоге, откуда вы запустили client.vi.

В поле Server Address укажите **fk219-prep**. В поле Web Server Port укажите **8000**. После этого запустите модуль, нажав на стрелку ⇨ в верхней панели. Если соединение установилось корректно, появится окно HFCV.vi. *Но это ещё не всё!*

Вновь вернитесь в окно модуля client.vi и нажмите на кнопку **Request Control**. Затем вновь возвратитесь в измерительный модуль HFCV.vi и запустите его, нажав на стрелку ⇨.

ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ



1. Установите начальное напряжение (от 0 до -5 В), конечное напряжение (от 0 до 5 В) и шаг по напряжению (так чтобы получилось не менее ста точек на графике).
2. Установите слайдером желаемую скорость сканирования так, чтобы расчётное время одного шага было бы не меньше 200 мс.
3. Нажмите кнопку "Старт измерения" и дождитесь окончания процесса.
4. Не нажимайте кнопку "Сохранить результат в файл", вместо этого щёлкните правой кнопкой мыши по таблице результатов и выберите "копировать в буфер обмена".

ЗАВЕРШЕНИЕ РАБОТЫ С УСТАНОВКОЙ

Если полученная в результате измерения кривая имеет разрывы либо вы получаете на выходе шум, следует открыть крышку измерительной камеры и переставить иглу верхнего контакта в другую позицию на исследуемой пластине. Игла должна воткнуться в алюминиевый контакт МДП-структуры с усилием, достаточным, чтобы удерживать кремниевую пластину от смещения. Измерения следует проводить с закрытой крышкой измерительной камеры. Можно перезапустить измерительный цикл, не выходя из программы, последовательно нажимая кнопку "Старт измерения" (она изменяет название на каждом этапе работы программы).

Чтобы выйти из программы на любой стадии работы и освободить компьютер-сервер для следующего подключения, нажмите на красный кружок в верхней панели. После остановки работы виртуальных инструментов закройте все окна исполняющей среды LabView.

Скопированные в буфер обмена результаты измерений сохраните в текстовый файл. Поскольку последующая обработка результатов может потребовать реализации достаточно сложных вычислительных процедур, рекомендуется сразу ориентироваться на работу с языком программирования Python.

Первым этапом обработки данных будет отображение полученной кривой на графике. Как это сделать с помощью программы на Python, можно посмотреть в нашем учебнике:

http://py.scilink.ru/1_5_matplotlib/

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МДП-СТРУКТУРЫ

1. Тип проводимости подложки – определяется из ВЧ ВФХ по соответствию верхней полки кривой знаку V_g : если максимальная ёмкость C_{max} достигается при изменении V_g в положительную сторону – то это n-тип, если в отрицательную, то p-тип. **Объясните, почему это так?**

2. Толщина диэлектрика вычисляется по формуле $d_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}\epsilon_0 S}{C_{ox}}$, где ϵ_{ox} - диэлектрическая проницаемость диэлектрика, S – площадь диэлектрика (равная площади контакта МДП-структуры), C_{ox} - ёмкость диэлектрика, которая соответствует верхней полке ВЧ ВФХ, т.е. максимальной измеренной ёмкости C_{max} . **Объясните, почему это так и откуда взялась данная формула?**

3. Величина легирующей примеси N_B и положение уровня Ферми относительно середины запрещённой зоны $e\varphi_0$ могут быть вычислены путём итерационной подгонки следующей системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_B = \frac{2 \left(2\varphi_0 - \frac{kT}{q} \right)}{q \epsilon_s \epsilon_0 S^2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{C_{min}} - \frac{1}{C_{max}} \right)^2} \\ \varphi_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_B}{n_i}, \text{ где } n_i = \sqrt{N_C N_V} \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}}, N_C = 4.85 \cdot 10^{15} (m_n T)^{\frac{3}{2}}, N_V = 4.85 \cdot 10^{15} (m_p T)^{\frac{3}{2}} \end{array} \right.$$

Здесь k – постоянная Больцмана, T – температура (комнатная), q – заряд электрона, h – постоянная Планка, E_g – ширина запрещённой зоны полупроводника при комнатной температуре, m_n и m_p – эффективные массы электронов и дырок, соответственно (табличные значения). Для системы СИ не забудьте умножить n_i на 10^4 . **Как это вычислить и откуда взялись эти формулы?**

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МДП-СТРУКТУРЫ

4. Определяем реальное напряжение плоских зон V_{FB} (эксп.). Для этого, зная толщину подзатворного диэлектрика d_{ox} , концентрацию легирующей примеси $N_A \approx N_B$ и работу выхода материала затвора (работа выхода алюминия = 4.2 эВ, работа выхода кремния n-типа = 4.0 эВ, p-типа = 4.4 эВ), рассчитывают теоретическое значение напряжения плоских зон идеальной МДП-структуры $V_{FB} = \Delta\varphi_{ms}$ и соответствующее ему значение ёмкости плоских зон C_{FB} .

$$C_{FB} = \left(\frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{sc}(\psi_s = 0)} \right)^{-1}, \text{ где } C_{sc}(\psi_s = 0) = \sqrt{\frac{\epsilon_s \epsilon_0 e N_A}{\frac{kT}{q}}} \cdot S$$

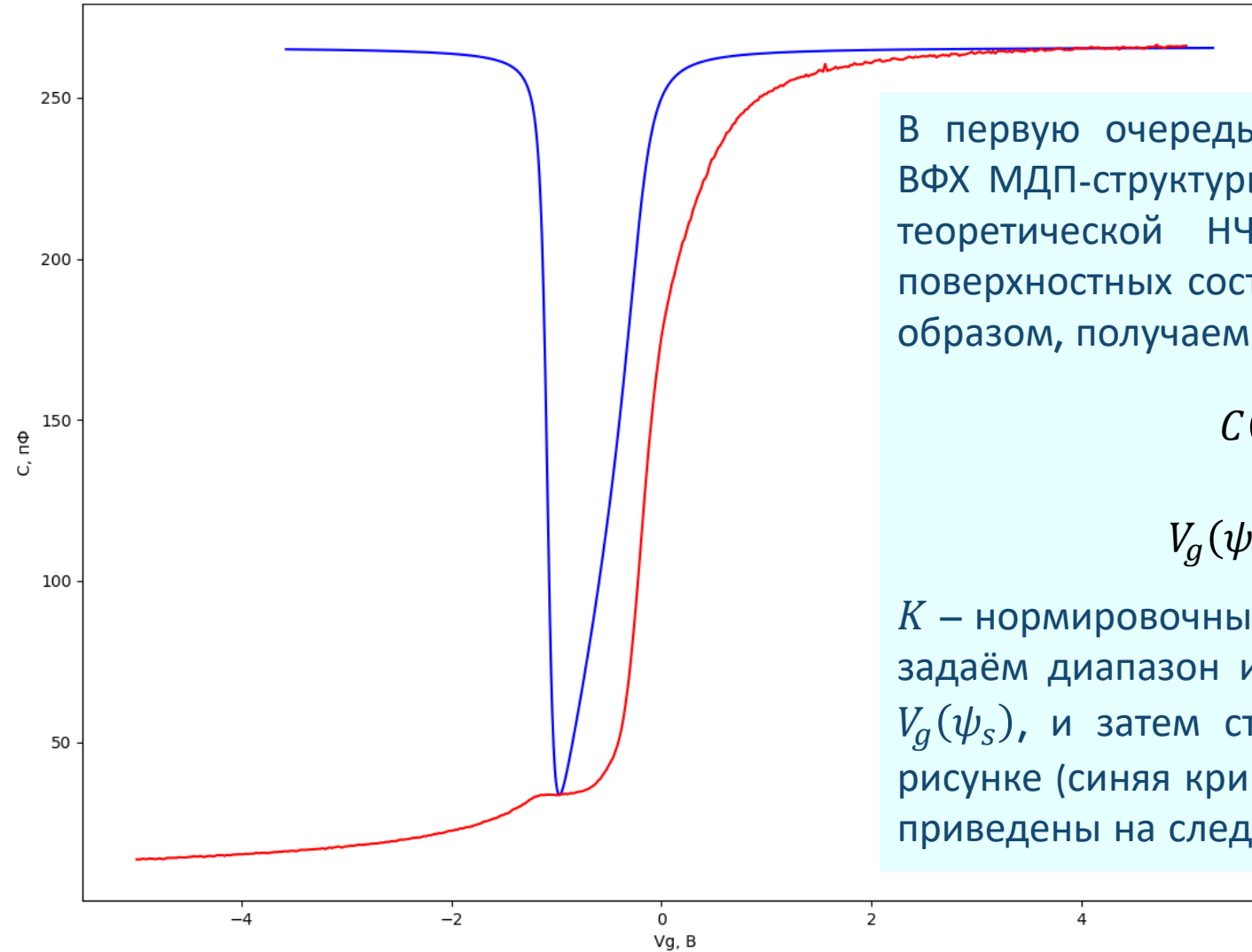
Поскольку экспериментальная C-V кривая высокочастотная, т.е. $C_{ss} \rightarrow 0$, то, проводя на графике ВФХ горизонталь C_{FB} (теор.), получаем при пересечении этой кривой с экспериментальной ВФХ напряжение, соответствующее $\psi_s = 0$, т.е. экспериментальное напряжение плоских зон V_{FB} (эксп.). **Откуда взялась первая формула?**

5. Оцениваем величину встроенного в диэлектрик заряда. Используем соотношение:

$Q_{ox} = C_{ox} \cdot V_{FB(\text{эксп.})} \left(1 - \frac{x_c}{d_{ox}} \right)$. Значение центра локализации заряда x_c берём в двух вариантах: посередине диэлектрика ($x_c = d_{ox}/2$) и вблизи границы "полупроводник-диэлектрик" (x_c на ваше усмотрение). **Что меняет заряд в диэлектрике в виде ВЧ ВФХ?**

ВЫЧИСЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ПС – 1 ЭТАП

Сравнение ВЧ ВФХ с теоретической НЧ ВФХ кривой



В первую очередь необходимо построить теоретическую НЧ ВФХ МДП-структуры с учётом найденных ранее параметров. В теоретической НЧ ВФХ мы не будем учитывать вклад поверхностных состояний, соответствующая ёмкость = 0. Таким образом, получаем следующие соотношения:

$$C(\psi_s) = K \left(\frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{sc}(\psi_s)} \right)^{-1}$$

$$V_g(\psi_s) = V_{FB \text{ (эксп.)}} + \psi_s + \frac{Q_{sc}(\psi_s)}{C_{ox}}$$

K – нормировочный коэффициент. Иными словами, сначала мы задаём диапазон измерения ψ_s , от которого считаем $C(\psi_s)$ и $V_g(\psi_s)$, и затем строим зависимость $C(V_g)$, как показано на рисунке (синяя кривая). Формулы для расчёта $C_{sc}(\psi_s)$ и $Q_{sc}(\psi_s)$ приведены на следующем слайде.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ПС – 1 ЭТАП

$$Q_{sc}(\psi_s) = \begin{cases} \sqrt{2kT\varepsilon_s\varepsilon_0 n_0} \cdot F_n(\psi_s) \cdot S \cdot \text{sign}(\psi_s), & \text{для } n \text{ – типа} \\ \sqrt{2kT\varepsilon_s\varepsilon_0 p_0} \cdot F_p(\psi_s) \cdot S \cdot \text{sign}(\psi_s), & \text{для } p \text{ – типа} \end{cases}$$

принимая $n_0 \approx N_B$ (либо $p_0 \approx N_B$), далее $\beta = q/kT$

$$F_n(\psi_s) = \sqrt{e^{\beta\psi} - \beta\psi - 1 + e^{-2\beta\varphi_0}(e^{-\beta\psi} + \beta\psi - 1)}$$

$$F_p(\psi_s) = \sqrt{e^{-\beta\psi} + \beta\psi - 1 + e^{-2\beta\varphi_0}(e^{\beta\psi} - \beta\psi - 1)}$$

$$C_{sc}(\psi_s) = \begin{cases} \left| \frac{q^2 n_0}{\sqrt{2kT\varepsilon_s\varepsilon_0}} \cdot \frac{1 - e^{\beta\psi} + e^{-2\beta\varphi_0}(e^{-\beta\psi} - 1)}{F_n(\psi_s)} \right| \cdot S, & \text{для } n \text{ – типа} \\ \left| \frac{q^2 n_0}{\sqrt{2kT\varepsilon_s\varepsilon_0}} \cdot \frac{1 - e^{-\beta\psi} + e^{-2\beta\varphi_0}(e^{\beta\psi} - 1)}{F_p(\psi_s)} \right| \cdot S, & \text{для } p \text{ – типа} \end{cases}$$

Следует обратить внимание, что интервал для ψ_s следует выбирать очень корректно, иначе есть риск уйти в физически недостоверную область или получить ошибку деления на нуль. Рекомендуемый стартовый диапазон от -0.49 до 0.51 В с шагом 0.05 В, в дальнейшем шаг можно уменьшить.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ПС – 2 ЭТАП

В результате проведённых расчётов вы должны получить набор значений $V_{g1}(\psi_s)$ для теоретической кривой и такой же по количеству значений набор $V_{g2}(\psi_s)$ для экспериментальной кривой, соответствующих одинаковым значениям ёмкостей $C(\psi_s)$. Очевидно, что шаг по ψ_s не совпадает с шагов ваших экспериментальных данных, поэтому программа должна либо интерполировать значение между ближайшими экспериментальными точками, либо взять ближайшую к значению ёмкости экспериментальную точку, при этом исключив возможные повторы. Это самый сложный этап расчётов. Для упрощения работы и контроля ошибок рекомендуется сохранить полученные наборы данных в файл.

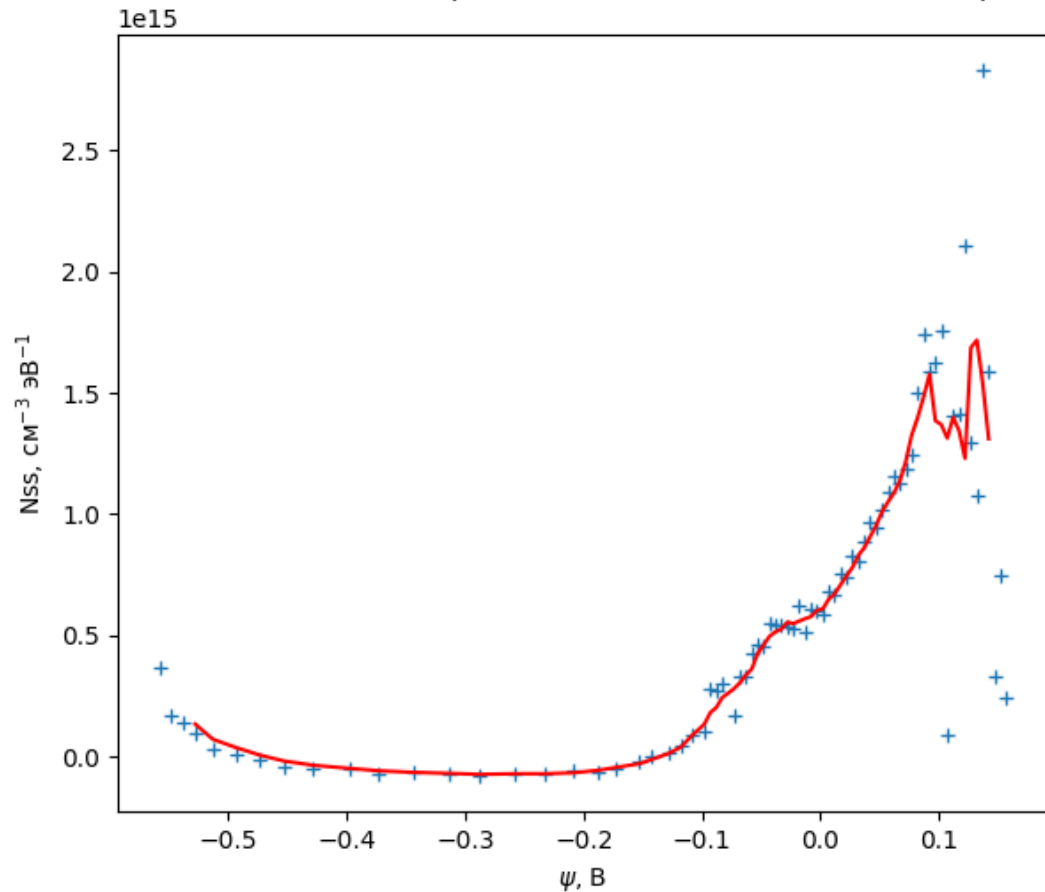
Энергетическая плотность поверхностных состояний $N_{SS}(\psi_s)$ может быть рассчитана несколькими методами. Наиболее простым, хотя и недостаточно точным, является дифференциальный метод Термана. Расчёт проводится по следующей формуле:

$$N_{SS}(\psi_s) = \frac{C_{ox}}{q} \cdot \frac{d\Delta V_g(\psi_s)}{d\psi_s} \cdot S$$

Здесь $\Delta V_g(\psi_s) = V_{g2}(\psi_s) - V_{g1}(\psi_s)$. Главной проблемой метода является сильный разброс значений в случае зашумлённых экспериментальных данных, поскольку даже небольшая погрешность в измерении, будучи продифференцированной, превращается в сильный разброс, что снижает точность вычислений. Поэтому рекомендуется дважды использовать функцию сглаживания (http://py.scilink.ru/3_1_data_smoothing/) – вначале для того, чтобы уменьшить разброс по $\Delta V_g(\psi_s)$, затем для уточнения вида $N_{SS}(\psi_s)$.

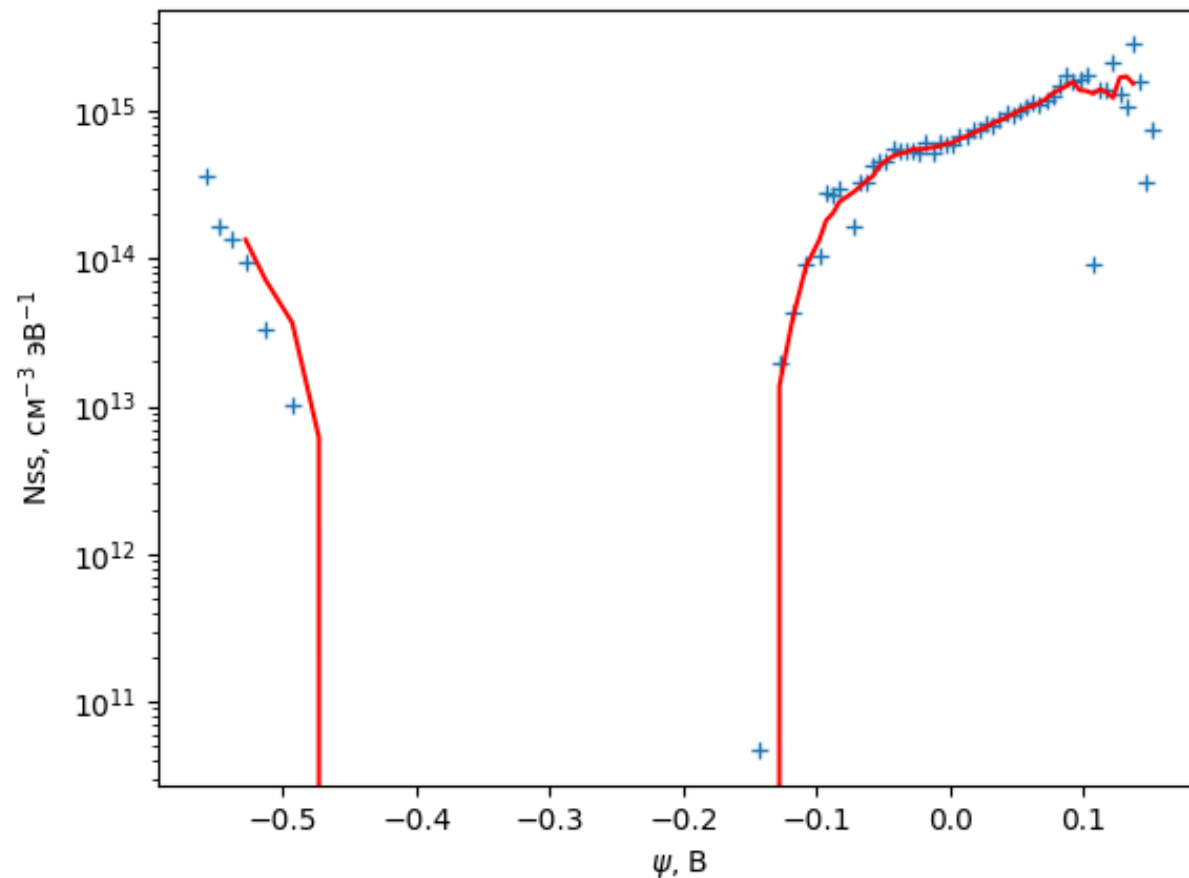
ВЫЧИСЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ПС – 2 ЭТАП

Расчёт плотности поверхностных состояний методом Термана



в линейных координатах

Расчёт плотности поверхностных состояний методом Термана



в полулогарифмических координатах

ФРАГМЕНТЫ КОДА: ФУНКЦИИ

```
# зависимость ширины запрещённой зоны кремния от температуры
def Eg(T):
    return (1.21 - 3.6E-4*T)*q

# вычисление собственной концентрации носителей в полупроводнике
def ni(T):
    Nc = 4.85e15*(mn*T)**1.5
    Nv = 4.85e15*(mp*T)**1.5
    return np.sqrt(Nc*Nv)*np.exp(-Eg(T)/(2*k*T))*1e6 # в расчёте на метр

# вычисление заряда в ОПЗ в зависимости от поверхностного потенциала
def Qsc(psi, type='n'):
    b = q/k/T
    if type == 'p':
        F = np.sqrt(np.exp(-b*psi)+b*psi-1+np.exp(-2*b*resFi0)*(np.exp(b*psi)-b*psi-1))
    else:
        F = np.sqrt(np.exp(b*psi)-b*psi-1+np.exp(-2*b*resFi0)*(np.exp(-b*psi)+b*psi-1))
    return np.sqrt(2*k*T*EpsS*Eps0*Na) * F * S * np.sign(psi)

# функция для сглаживания данных
def smooth(x_data, y_data, win=4):
    filt = np.ones(win)/win
    mov = win//2
    return x_data[mov:-mov], np.convolve(y_data, filt, mode='same')[mov:-mov]
```