

Туннелирование в полупроводниках

Шмаков Владимир — ФФКЭ Б04-105

Цель работы

- Исследовать принцип действия туннельного диода
- Измерить вольт-амперную характеристику
- Оценить положения уровней Ферми

Теоретические сведения

Полупроводник — материал, занимающий промежуточное место между изоляторами и проводниками. При нулевой температуре, зона проводимости полупроводника оказывается пустой (это «роднит» полупроводники и изоляторы). Однако расстояние между валентной зоной и зоной проводимости у полупроводника значительно меньше чем у изолятора (смотрите рисунок 1).

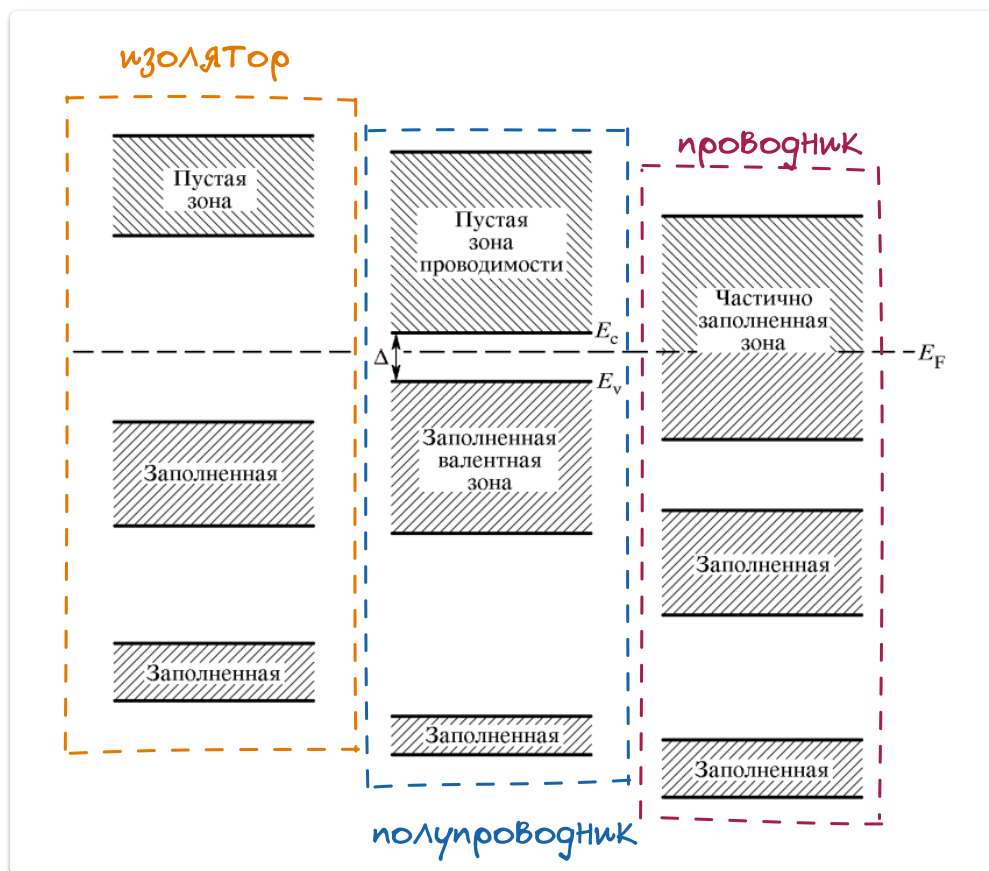


Рисунок 1. Диаграмма энергетических зон для различных материалов.

Введение в полупроводник примесей приводит к появлению разрешенных уровней в запрещенной зоне. Примеси, которые приводят к образованию в

полупроводнике уровней вблизи нижнего края зоны проводимости называются **донорными**. Примеси, приводящие к появлению уровней вблизи границы валентной зоны называются **акцепторными**.

Если концентрация акцепторов в полупроводнике превышает концентрацию доноров, то говорят что полупроводник является проводником ***p - типа***. В противном случае, говорят что полупроводник является проводником ***n - типа***.

Создадим узкий $p - n$ переход. В сильно легированных полупроводниках в области узкого $p - n$ перехода становятся возможными туннельные переходы электронов. Обозначим $\xi = \mu_n - E_c$ - расстояние между уровнем Ферми полупроводника $n - типа$ и зоной проводимости. $\eta = \mu_p - E_v$ - расстояние между уровнем Ферми полупроводника $p - типа$ и валентной зоной.

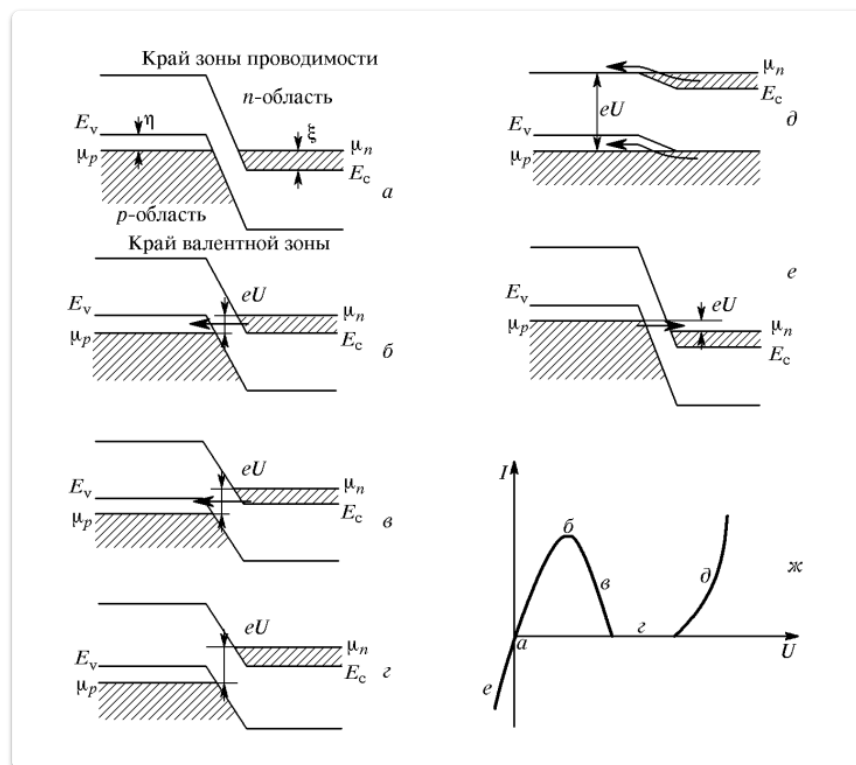


Рисунок 2. Схема энергетических уровней при различных напряжениях на туннельном диоде.

Рассмотрим, как изменяется схема энергетических уровней туннельного диода при приложении внешнего напряжения:

- При отсутствии внешнего поля уровни Ферми μ_n и μ_p лежат на одной горизонтали. Перекрывание свободных и занятых уровней отсутствует — через диод не протекает ток.

- По мере увеличения внешнего напряжения смещение зон уменьшается. Часть занятых состояний в n - области перекрывается с незанятыми состояниями в p - области (смотрите рисунок 2(б)). Ток возрастает.
- При дальнейшем увеличении напряжения перекрытие уровней достигает максимума. Затем состояния в n области перекрываются с запрещенными состояниями в p области. Ток через диод падает (смотрите рисунок 2(в)).
- Дно зоны проводимости n области перекрывается с запрещенной зоной p области (рисунок 2(г)). При напряжении $U = (\xi + \eta)/e$ ток полностью прекращается.
- При дальнейшем увеличении напряжения занятые уровни в n области перекрываются с незанятыми уровнями в p - области. Появляется экспоненциально растущий диффузный ток.

Методика

Оборудование

- Туннельный и диффузный диод
- Амперметр
- Вольтметр
- Осциллограф
- Звуковой генератор
- Потенциометры
- Набор постоянных сопротивлений

Эксперимент 1 - наблюдение ВАХ на экране осциллографа

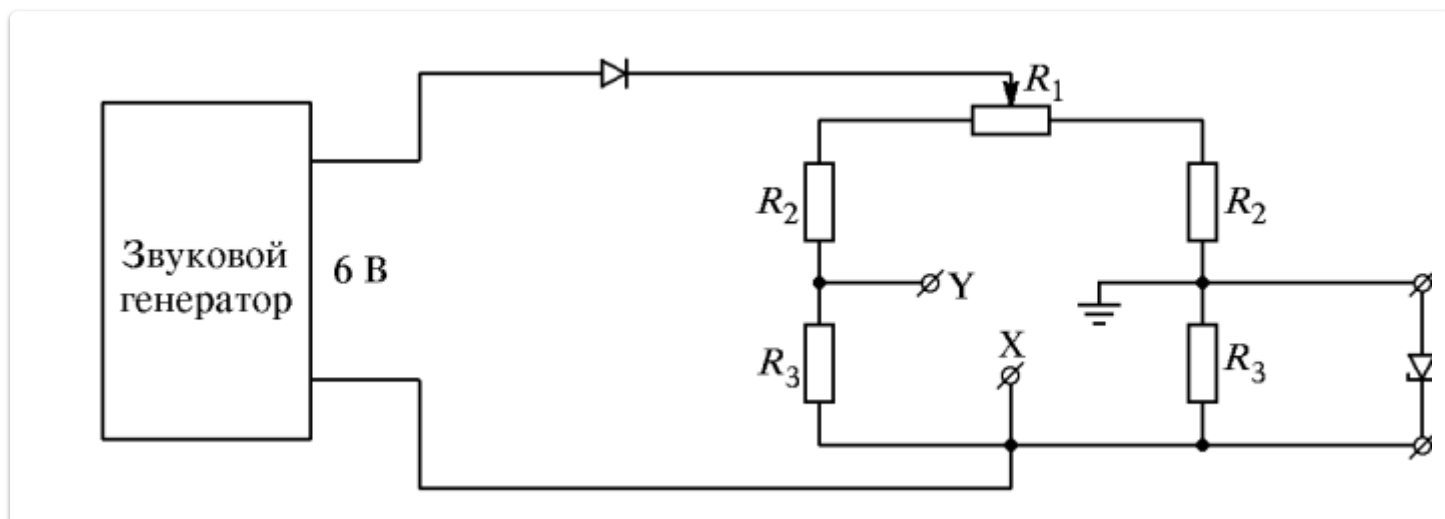


Рисунок 3. Схема наблюдения вольт-амперной характеристики на экране осциллографа.

Схема эксперимента изображена на рисунке 3. На вход «Y» осциллографа подаётся напряжение пропорциональное току, протекающему через диод. На вход «X» - падение напряжения на диоде.

Подавая переменное напряжение на вход цепи получаем изображение ВАХ на экране осциллографа.

Эксперимент 2

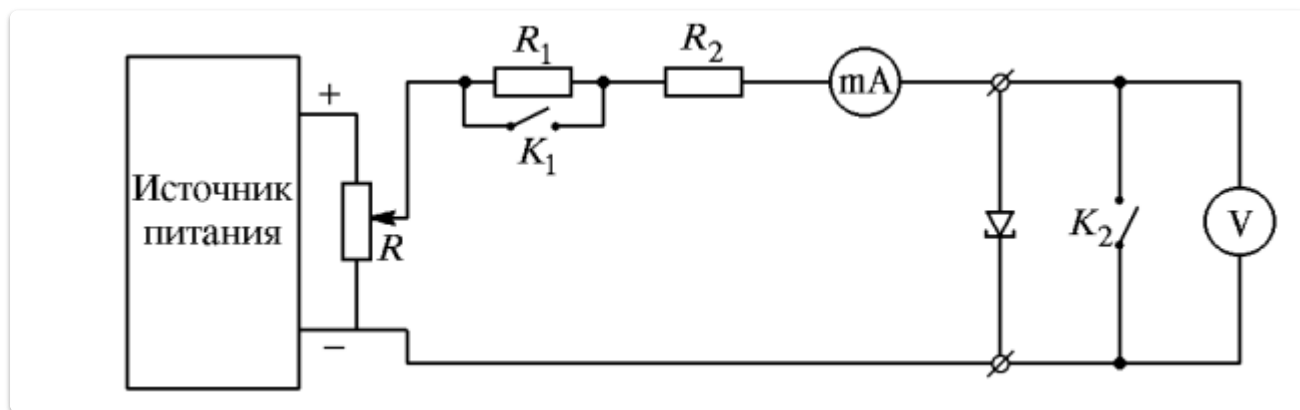


Рисунок 4. Схема для снятия ВАХ диода

Схема, изображенная на рисунке 4, аналогична схеме изображенной на рисунке 3. Изменение напряжения на диоде происходит при помощи потенциометра(вручную).

Эксперимент 3

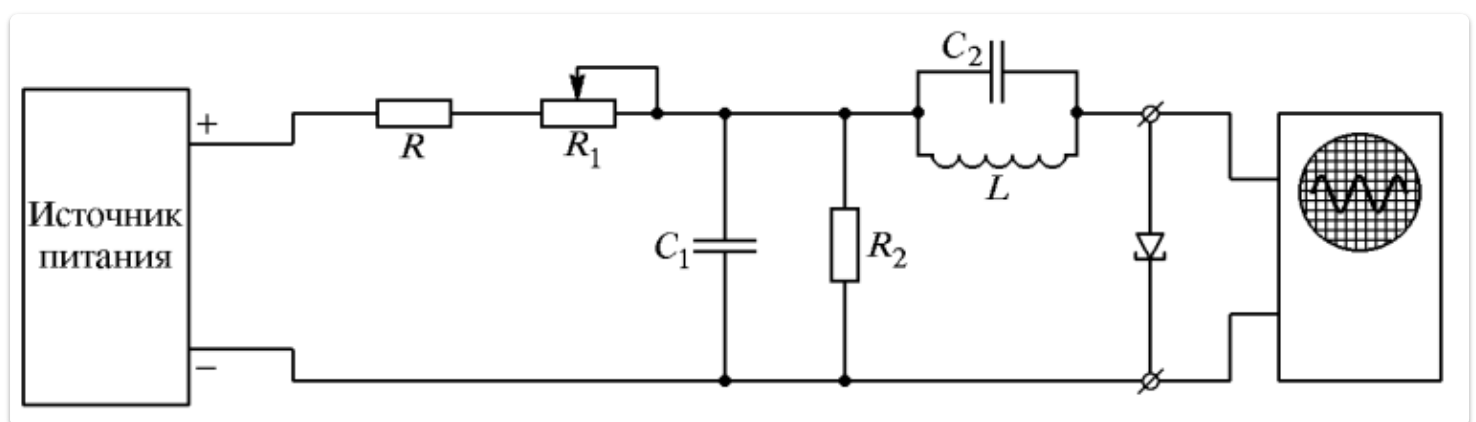


Рисунок 5. Генератор на туннельном диоде

Схема генератора изображена на рисунке 5. «Основой» генератора является LC - контур. Чтобы поддерживать колебания в цепи используется обратная связь, при этом диод позволяет «отсекать» отрицательные части колебаний.

Также диод выступает в роли усилителя. Необходимое условие усиления — отрицательное дифференциальное сопротивление.

Обработка экспериментальных данных

Эксперимент 1 - наблюдение ВАХ на экране осциллографа

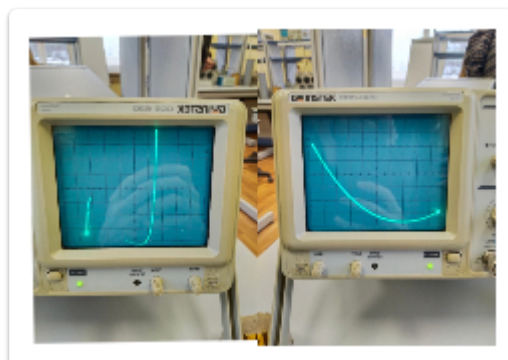


Рисунок 6. Осциллограммы полученные в ходе эксперимента.

При помощи программы «plotDigitalizer» оцифруем изображения осциллограмм.

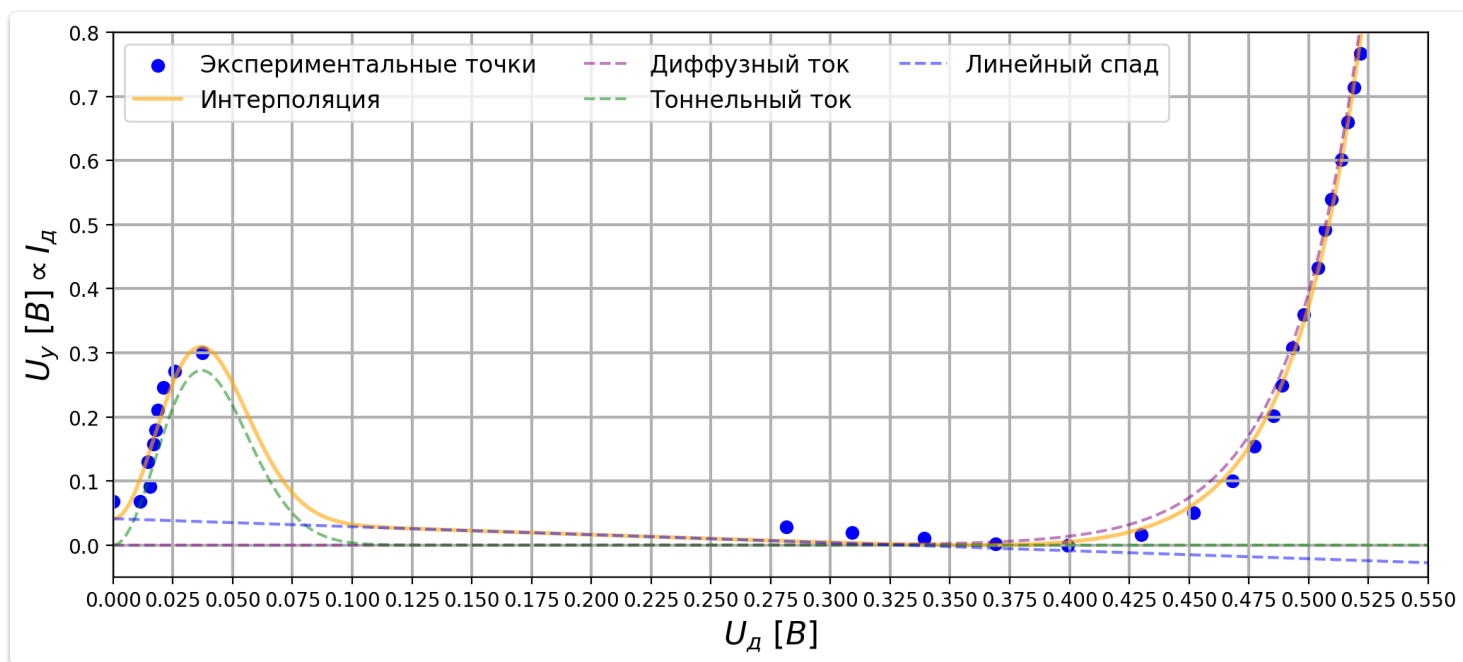


Рисунок 7. Интерполяция осциллограммы

Экспериментальные данные можно приблизить суммой трёх функций:

- $A \exp(B \cdot x)$ - экспоненциально возрастающий диффузный ток
- $Dx^2 \cdot \exp(-Ex^2)$ - туннельный ток
- $F + G \cdot x$ - линейная функция(склейка токов посередине)

Результат приближения экспериментальных данных суммой трёх описанных выше функций изображен на рисунке(рисунке). Из интерполяции

могут быть найдены ключевые напряжения U_p , U_v , U_f :

- U_p - argmax зеленой кривой
- U_v - argmin общей интерполяции
- U_f - положение, где фиолетовая кривая достигает значения максимума зеленой кривой

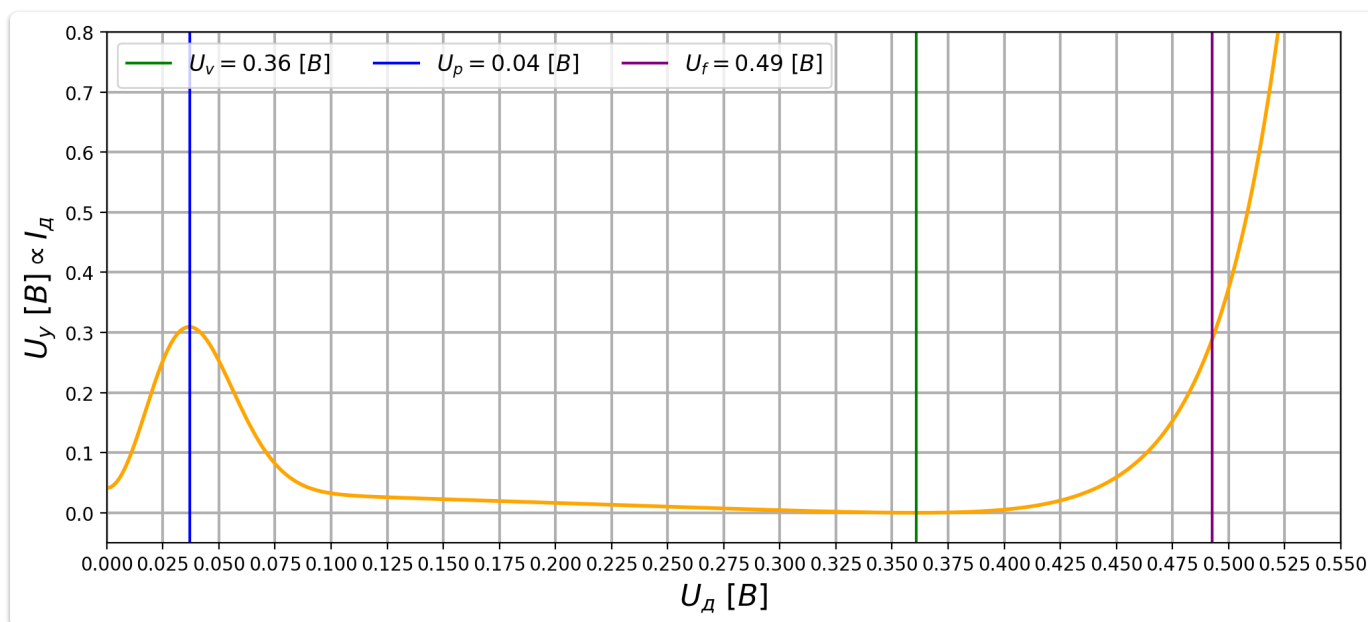


Рисунок 8. Ключевые значения напряжений, найденные по данным первого эксперимента.

Эксперимент 2

Интерполируем данные полученные в ходе второго эксперимента:

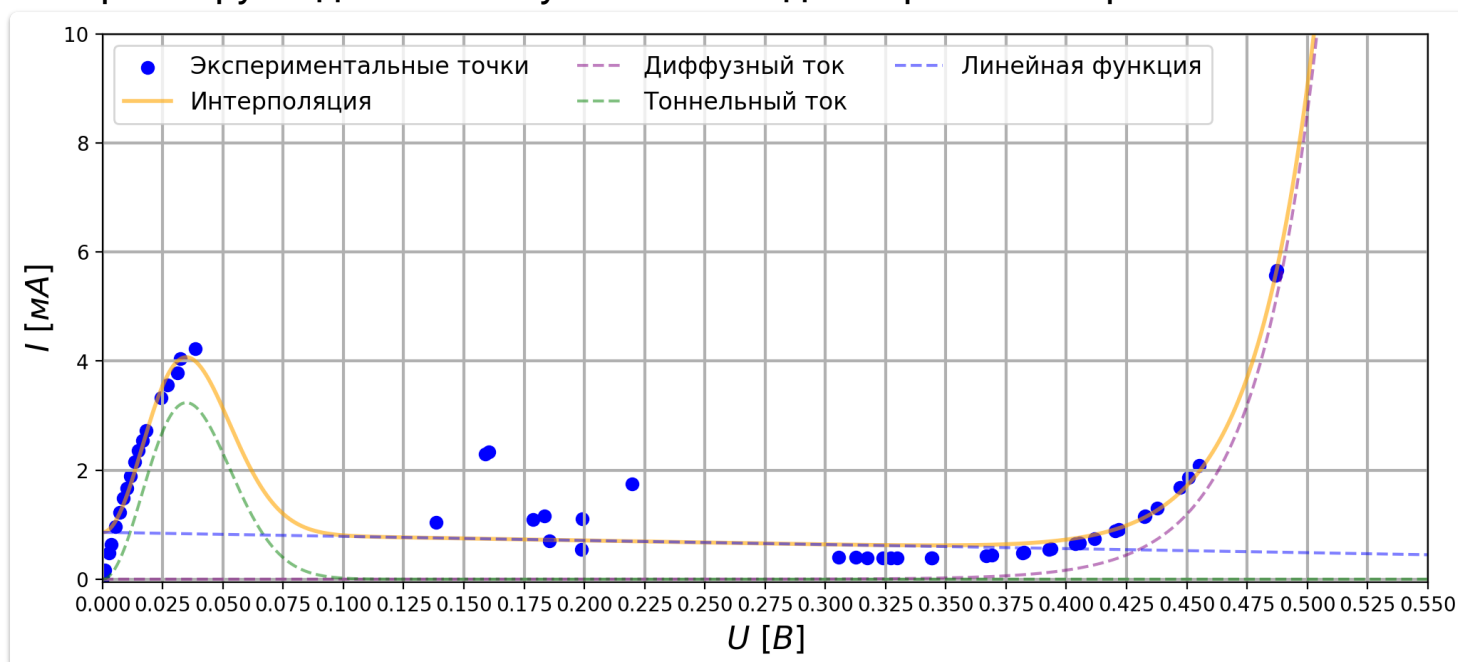


Рисунок 9. Интерполяция экспериментальных данных второго эксперимента.

Можем найти ключевые значения напряжений:

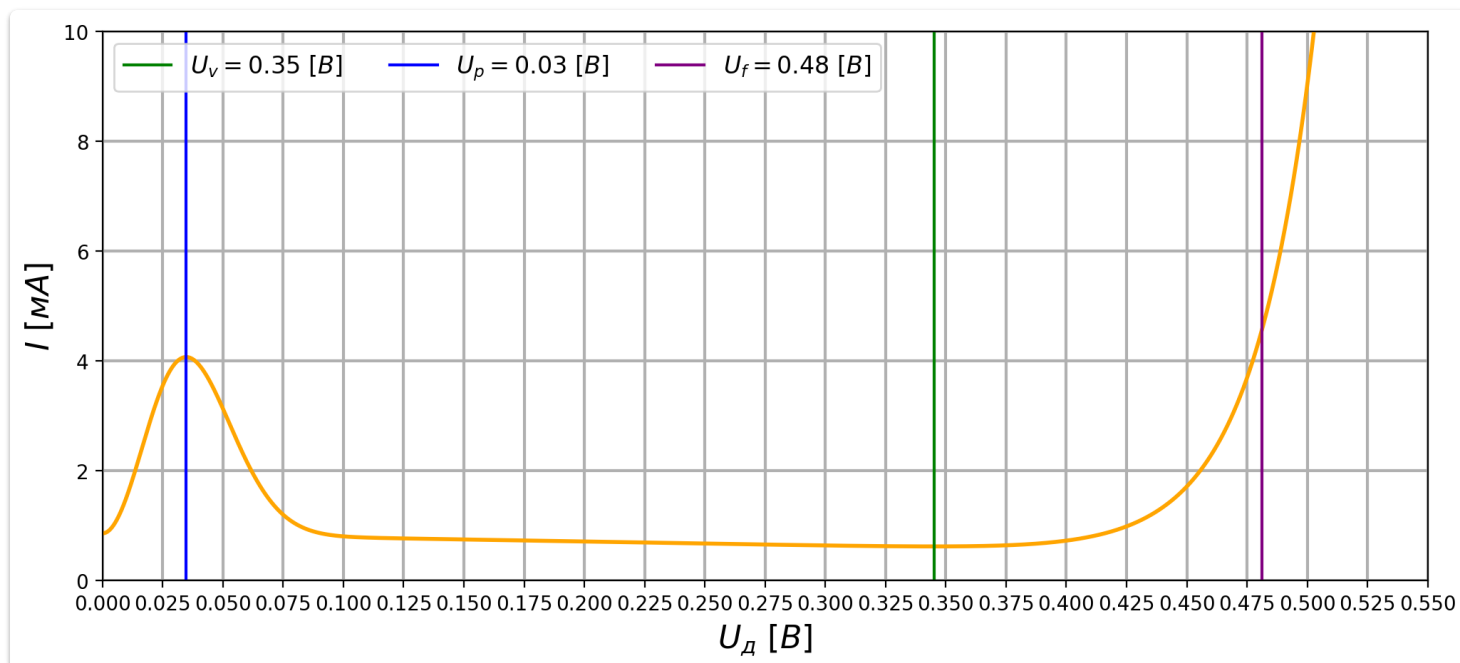


Рисунок 10. Ключевые значения напряжений

Найденные напряжения позволяют найти положения уровней Ферми:

$$\xi = \frac{eU_v}{2} = 0.18 \pm 0.02 \text{ эВ}$$

расстояние между уровнем Ферми и границей зоны проводимости

$$E_{n \max} = \xi - eU_p = 0.15 \pm 0.02 \text{ эВ}$$

Расстояние между уровнем Ферми и уровнем с максимальной концентрацией электронов

Эксперимент 3

Соберем схему, изображенную на рисунке(рисунке).

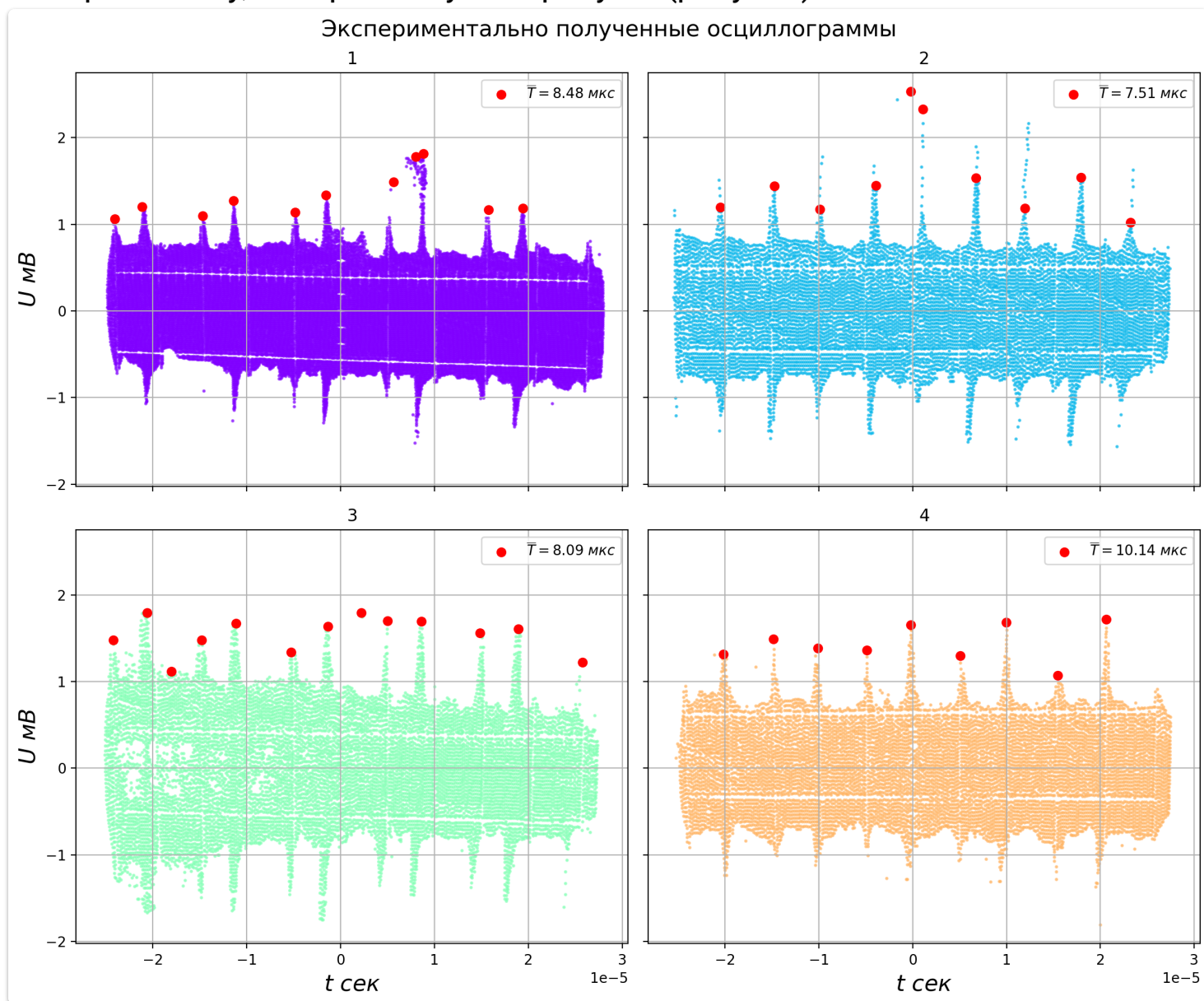


Рисунок 11. Нахождение периода колебаний по оцифрованным осциллограммам.

Предложенная схема позволяет получать колебания в диапазоне $0.10 \text{ МГц} - 0.13 \text{ МГц}$ (смотрите рисунок 11).

Вывод

В ходе эксперимента удалось оценить положения уровней Ферми и ключевые значения напряжений туннельного диода.

Полученные в ходе эксперимента вольт-амперные характеристики соответствуют теории. На ВАХ наблюдается область с отрицательным дифференциальным сопротивлением (между U_p и U_v). Эта область ВАХ позволяет использовать диод для усиления сигналов.