

УДК 621.382

## МЕТОД МОДУЛЯЦИОННОГО ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В ДИАГНОСТИКЕ КАЧЕСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

Сопряков В.И., Кастевич А.Е.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Контроль статической вольт-амперной характеристики (ВАХ) полупроводниковых нелинейных элементов и её параметров является распространённой формой операционного контроля и контроля готовой продукции, так как он является неразрушающим и может быть реализован простыми методами и средствами. На ВАХ полупроводниковых приборов оказывают влияние химические примеси и электрически активные дефекты, неоднородности распределения электрофизических параметров материала, микро и макродефекты структуры, состояние поверхности и качество контактов. Эти факторы определяют надёжность прибора, однако их влияние на ВАХ может быть незначительным и не может быть обнаружено по её виду.

Измерение и запись кривой второй производной ВАХ  $I''(U)$  позволяет решить задачу разрешения её тонкой структуры и определения факторов, влияющих на надёжность. В зависимости от типа прибора и ветви ВАХ, в которой проводится контроль, получаемая информация может носить как качественный, так и количественный характер.

Известно, что амплитуда второй гармоники ( $U_2$ ) переменного тока низкой частоты в режиме малого сигнала в цепи нелинейного элемента пропорциональна  $I''(U)$ . Для измерения  $I''(U)$  разработана установка модуляционного дифференцирования ВАХ, в которой реализован метод детектирования гармоник. Установка позволяет измерять и записывать

на двухкоординатный потенциометр ВАХ и её вторую производную в диапазонах 0–2,0 В и 0–1000 В. Чувствительность в режиме измерения второй гармоники составляет от 0,3 до 1 мкВ при отношении сигнал-шум, равном трём.

В сильно легированных р-п-переходах с концентрацией мелких примесей  $10^{19}$ – $10^{21}$  см<sup>-3</sup> преобладает туннельный механизм проводимости, что позволяет реализовать туннельную инжекцию носителей заряда на глубокий уровень. Следствием такого процесса является образование в прямой ветви ВАХ малых максимумов избыточного тока, которые суммируются с гладкой компонентой ВАХ, имеющей экспоненциальный характер (рисунок 1).

Принимая максимум избыточного тока в форме нормального распределения, получена формула для обработки экспериментальных зависимостей напряжения второй гармоники от напряжения смещения на образце

$$I_{tm} = 0,115(4U_{2tm}/U_{\Pi}^2 R_{\Pi}) \Delta U^2, \quad (1)$$

где  $I_{tm}$  – значение избыточного тока в максимуме,  $U_{2tm}$  – разность между значениями фоновой и сигнальной кривых напряжения второй гармоники (рисунок 1);  $U_{\Pi}$  – амплитуда напряжения переменного тока в цепи образца;  $R_{\Pi}$  – значение малого измерительного сопротивления, включенного последовательно с образцом;  $\Delta U$  – полуширина особенности кривой  $I''(U)$ . Предельное разрешение максимума избыточного тока составляет 0,003–0,01 от значения фонового тока.

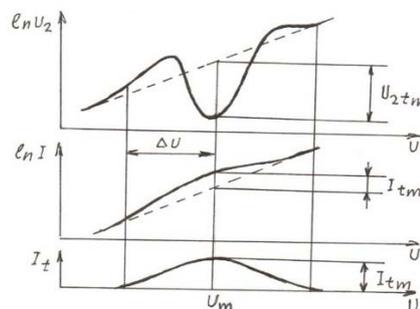


Рисунок 1 – Сложение максимума и фоновой избыточного тока (штриховая кривая)

В работе рассчитан избыточный туннельный ток, представляющий двухступенчатый процесс с участием глубокого уровня дефекта, включающий туннелирование и рекомбинацию. При условии полного перекрытия энергетических состояний электронов и глубокого центра приближённое аналитическое решение даёт

$$I_{tm} = AT_n \sigma_n^t E_{tm} \xi_t L, \quad (2)$$

где  $A = 4\pi m_n^*/(2\pi\hbar)^3$ ,  $T_n$  – прозрачность барьера;  $N_t$  – концентрация глубокого центра;  $\sigma_n^t$  – сечение захвата туннелирующего электрона;  $E_{tm}$  – средняя энергия туннелирующих электронов, отсчитанная от дна зоны проводимости;  $\xi_t$  – ширина распределения плотности энергетических состояний центра;  $L$  – ширина области поглощения туннелирующих носителей.

Разработан метод оценки положения и ширины энергетического распределения глубокого уровня дефекта, а также его концентрации согласно формулам (1) и (2). Энергетическое положение глубокого уровня однозначно связано с напряжением минимума на кривой  $I''(U)$ . Примеры разрешения структуры ВАХ с помощью двойного дифференцирования приведены на рисунках 2 и 3. Концентрационная чувствитель-

ность метода  $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , что по отношению к мелким примесям составляет  $10^{-4} - 10^{-6}$ .

На основе разработанного метода определён энергетический спектр и параметры остаточных и радиационных дефектов в сильно легированном p-GaAs ( $E_c - 0,22$ ;  $E_c - 0,41$ ;  $E_c - 0,73$ ;  $E_v + 0,32$ ;  $E_v + 0,10$  эВ).

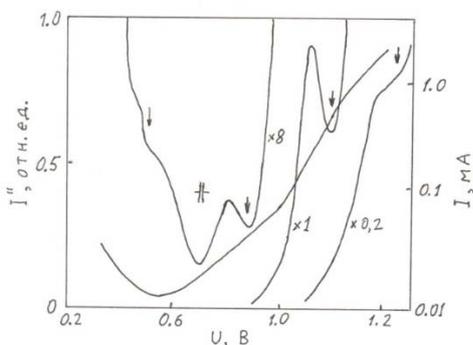


Рисунок 2 – ВАХ и её вторая производная диода на основе сильно легированного GaAs при  $T = 77 \text{ K}$  (стрелками указаны положения максимумов избыточного тока)

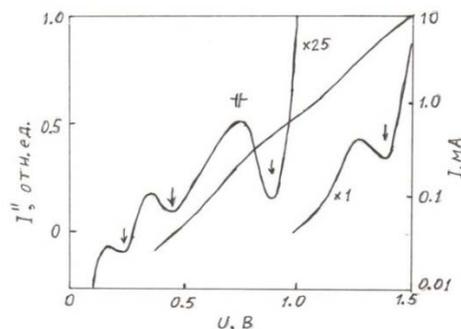


Рисунок 3 – ВАХ и её вторая производная диода на основе сильно легированного GaAs, облученного быстрыми электронами с энергией 30 МэВ интегральным потоком  $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  ( $T = 77 \text{ K}$ )

Концентрация технологических дефектов в зависимости от концентрации мелкой примеси изменяется в интервале  $10^{15} - 10^{17} \text{ см}^{-2}$ , а величина сечения захвата электронов в интервале  $10^{-15} - 10^{-17} \text{ см}^2$ . Экспериментальные кривые второй производной ВАХ могут быть хорошо объяснены с помощью предложенной модели.

УДК 621.382

## ЗАРЯДОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ФОТО-ЭДС

Микитевич В.А., Жарин А.Л.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

На этапе производства полупроводниковой микроэлектроники возникает необходимость измерения параметров полупроводниковых пластин. Существующие контактные методы измерения оказывают разрушающее воздействие на исследуемую поверхность, что приводит к уменьшению выхода годных изделий. Поэтому в последнее время все шире применяются бесконтактные зарядочувствительные методы измерения. Методы измерения контактной разности потенциалов (КРП) позволяют косвенно судить о наличии различных дефектов, неоднородности поверхности и т.п. Однако КРП сильно зависит от множества различных факторов, что затрудняет определение корреляции с конкретными физическими величинами. Другой характеристикой поверхности полупроводниковой пластины является поверхностная фото-ЭДС. Существует несколько способов измерения поверхности фото-ЭДС бесконтактным методом:

- 1) с непрерывной сканирующей засветкой образца;
- 2) метод измерения вибрирующим зондом Кельвина;
- 3) импульсный метод;

Метод измерения с непрерывной сканирующей засветкой образца основан на измерении разности работ выхода электрона. Измерение

производится за 2 этапа. На первом этапе измеряется работа выхода электрона при отсутствии освещения, на втором этапе – при непрерывном освещении лучом света. На основе полученных измерений рассчитывается поверхностная фото-ЭДС. Данный метод позволяет определять усредненное значение поверхностной фото-ЭДС по поверхности. При этом размеры области сканирования обычно составляют десятки нанометров [1].

Метод измерения вибрирующим зондом Кельвина аналогичен предыдущему методу. Отличие состоит в том, что используется вибрирующий зонд. Измерение проводится также в два этапа. Измерение также выполняется в два этапа. На первом этапе измерение производится в темноте. На втором этапе измерение производится при равномерном освещении всего образца. На основе разности полученных результатов измерений можно судить лишь о наличии фотоотклика. Такой метод измерения применяется для диэлектриков [2].

Основной недостаток вышеизложенных методов измерения – это необходимость проведения измерений за два этапа, что увеличивает время и погрешность измерений.

Импульсный метод измерения основан на измерении поверхностной фото-ЭДС при воздействии на исследуемый образец импульсным све-