

УДК. 621.315.592

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕТЕРОСТРУКТУР ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПОТЕНЦИАЛА ПОВЕРХНОСТИ

И. Ю. Бутусов, Я. А. Болдырева, С. В. Попов

Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия
им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
394064, Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54 а

Статья поступила в редакцию 11 июня 2019 г.

Аннотация. Работа посвящена измерению потенциала поверхности гетероструктур. Разработан измеритель потенциала поверхности гетероструктур методом динамического зонда Кельвина. Для вибрации измерительного зонда используется пьезоэлектрический вибратор. Работа выхода измерительного зонда составляет 5,0эВ, случайная ошибка измерений – 100 мВ.

Ключевые слова: потенциала поверхности, зонд Кельвина, гетероструктура.

Abstract. The work is devoted to the measurement of the surface potential of heterostructures. A surface potential meter for heterostructures was developed using the Kelvin dynamic probe method. A piezoelectric vibrator is used to vibrate the measuring probe. The output of the measuring probe is 5.0 eV, random measurement error is 100 mV.

Key words: surface potential, Kelvin probe, heterostructure.

Для исследования свойств гетероструктур применяется метод, использующий динамический зонд Кельвина [1, 2]. Этот метод является неразрушающим, так как измерения могут проводиться на поверхности без какой-либо дополнительной ее подготовки, и при этом не происходит контакта зонда с исследуемой поверхностью.

Работа выхода электрона для реальной поверхности полупроводника складывается из нескольких составляющих: работы выхода электрона из полупроводника, при условии плоских зон в полупроводнике A_S , изгиба энергетических зон в области пространственного заряда (ОПЗ) $e \cdot \varphi_s$, разницы

потенциальных энергий носителей на границах окисла $e \cdot U_D$ (e – заряд электрона). Если слой диэлектрика на поверхности полупроводника получен в результате проведения специальных технологических операций (окисления полупроводника, осаждения диэлектрика на полупроводник) и имеет высокое удельное сопротивление, то нельзя говорить о работе выхода из полупроводника. В этом случае следует рассматривать систему диэлектрик-полупроводник.

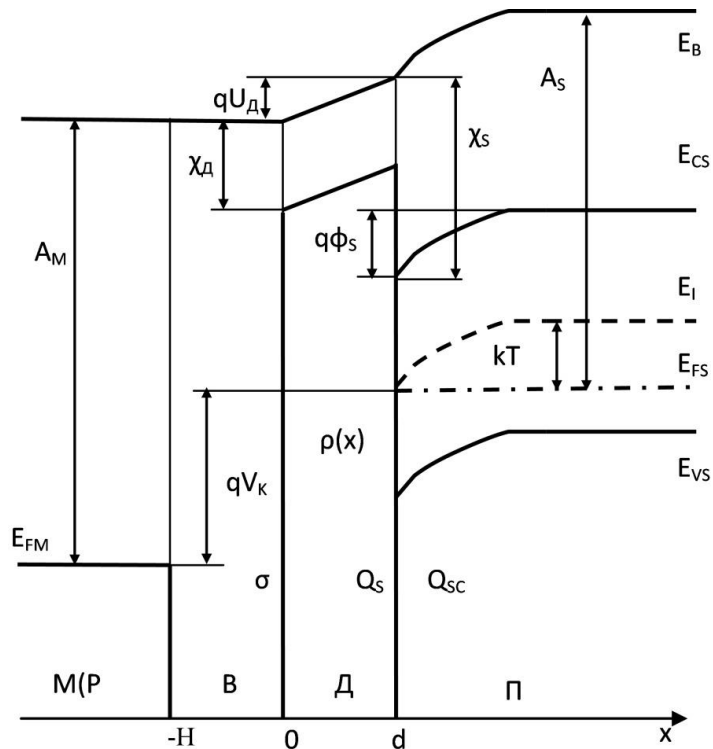


Рис.1 Энергетическая диаграмма структуры МВДП.

Энергетическая диаграмма структуры металл-вакуумный(воздушный) зазор-диэлектрик-полупроводник (МВДП) приведена на рис.1 (E_{FM} и E_{FS} – энергетические уровни Ферми металла (Pt) и полупроводника (П/П) соответственно, E_{CS} и E_{VS} – энергетические уровни "дна" зоны проводимости и "потолка" валентной зоны полупроводника соответственно, A_M – работа выхода металла измерительного зонда, ϕ_s – поверхностный потенциал, E_B – энергия электрона в вакууме, σ, Q_T, Q_S, Q_{SC} – заряды на поверхности диэлектрика, в нем, на границе диэлектрик – полупроводник и в ОПЗ соответственно).

При компенсационном методе измерений контактной разности потенциалов (КРП) динамическим зондом Кельвина напряженность электрического поля в вакуумном или воздушном зазоре между поверхностью измерительного металлического зонда и поверхностью диэлектрика равна нулю. Для выполнения этого условия к измерительному Pt зонду подключено напряжение компенсации V_K относительно полупроводника. Для системы МВДП напряжение компенсации V_K (то есть внешнее напряжение, введенное в систему, показанную на рис. 1, при котором напряженность поля в зазоре обращается в нуль) равно:

$$V_K = \frac{1}{e}(A_M - A_S) + \phi_S + \frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon d} \int_0^d x \rho(x) dx + \left(\frac{\sigma d}{\varepsilon_0 \varepsilon} \right), \quad (1)$$

где A_M и A_S – работа выхода электрона для металла и полупроводника при условии плоских зон соответственно; ε и d – диэлектрическая проницаемость и толщина плёнки изолятора соответственно, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная вакуума, A_S – термодинамическая работа выхода из полупроводника при отсутствии зарядов на границах и в приграничной области полупроводника.

Таким образом, измерение КРП систем МВДП в процессе различных внешних воздействий позволяет получить информацию о зарядовом состоянии диэлектрика и приповерхностной ОПЗ полупроводника. Установка для измерения потенциала поверхности методом динамического зонда Кельвина имеет следующую структуру (рис.2). С задающего генератора G1 синусоидальный сигнал подается на усилитель мощности A2 и с него на пьезоэлектрический вибратор, состоящий из пластины пьезоэлектрика (3), к которой прикреплен зонд (1), изготовленный из платиновой проволоки с полированным торцом.

При подаче на вибратор переменного напряжения торец зонда колеблется перпендикулярно плоскости поверхности исследуемой пластины (2) с частотой 2500 Гц. Если в зазоре торец зонда – поверхность пластины напряженность электрического поля не равна нулю, то через зазор протекает ток смещения I_{CM} .

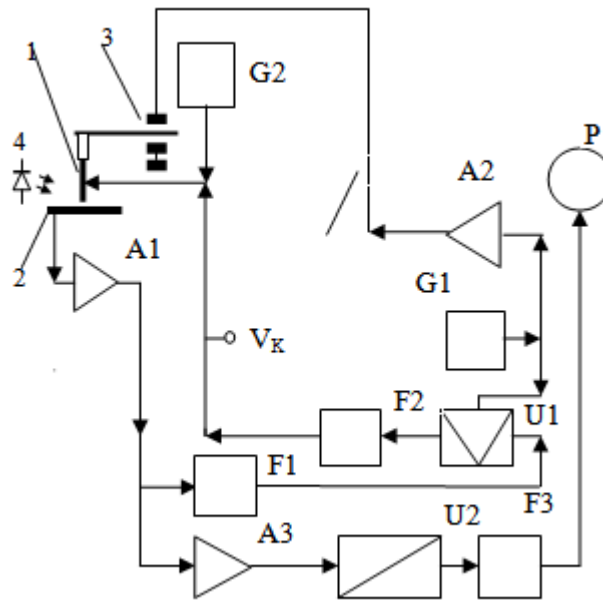


Рис. 2. Блок-схема измерительной установки.

В основе работы устройства лежит компенсационный принцип, и оно "стремится" минимизировать величину I_{CM} . Этот ток I_{CM} преобразуется в переменное напряжение предварительным усилителем A1, имеющим высокоомный вход. Затем сигнал фильтруется и усиливается активным полосовым фильтром F1, и поступает на вход синхронного фазового детектора U1, который пропускает сигнал, пропорциональный I_{CM} . Сигнал с детектора U1 проходит на интегратор F2, где он сглаживается. С выхода интегратора F2 сигнал (напряжение V_K) подается на вольтметр (на схеме не показан), регистрирующий величину V_K , и на платиновый зонд.

Кроме того, устройство определяет среднее расстояние между торцом платинового зонда и исследуемой поверхностью. Для этого высокочастотный сигнал частотой 500кГц с генератора G2 поступает на зонд и через зазор зонд-пластина проходит на вход усилителя A1. Высокочастотный сигнал, поступающий на вход усилителя A1, пропорционален емкости промежутка зонд-пластина и обратно пропорционален расстоянию зонд-пластина. Далее высокочастотный сигнал усиливается усилителем A3 и детектируется амплитудным детектором U2. Постоянное напряжение на выходе детектора U2 обратно пропорционально расстоянию зонд - пластина. Компаратор-интегратор

F3 сравнивает это напряжение с заданным уровнем и, если оно этому уровню не соответствует, то формирует сигнал, подающийся на индикатор отклонения Р.

Батарея светодиодов (4) позволяет проводить измерения КРП в темноте и в широком диапазоне освещённостей поверхности исследуемого образца.

С целью проверки общей работоспособности установки и определения эффективной работы выхода A_M материала торца зонда были проведены калибровочные измерения на пластине InAs (арсениде индия) и платиновой плёнке толщиной приблизительно 1мкм, напылённой на кремниевую пластину. Измерения проводились в воздухе в десяти точках поверхности этих образцов. При этом V_K для InAs составляет 150 ± 10 мВ и для Pt -300 ± 10 мВ. Разброс значений V_K объясняется некоторой неоднородностью поверхности, и как следствие, дисперсией работы выхода из неё.

Из литературных данных [3] работы выхода составляют для InAs-4,9эВ, для Pt- 5,3эВ. Таким образом, эффективная работа выхода зонда A_M составляет 5,0эВ.

К недостаткам вышеописанной конструкции измерителя КРП следует отнести большую погрешность измерения V_K . При тщательной ручной регулировке расстояния зонд – исследуемая поверхность и температуре окружающей среды $20 \pm 1^\circ\text{C}$ погрешность измерения примерно 10 мВ, в противном случае – возрастает до 100 мВ.

Литература

1. Бутусов И.Ю., Крячко В.В., Лобов И.Е., Котов В.В. Измерение потенциала поверхности кремниевых пластин в процессе производства БИС. *Электронная промышленность*. 1994. №4-5. С.104-105.
2. Крячко В.В., Бутусов И.Ю., Линник В.Д., Сонов Г.В. Измерение профиля плотности зарядовых состояний на окисленных кремниевых пластинах. *Электронная промышленность*. 1994. №4-5. С. 109-111.

3. Фоменко В.С. *Эмиссионные свойства материалов*. Справочник. Киев: Наукова думка, 1981г. – 339 с.

Для цитирования:

И. Ю. Бутусов, Я. А. Болдырева, С. В. Попов. Определение характеристик гетероструктур при измерении потенциала поверхности. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 8. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/aug19/11/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.8.11