

верхностной рекомбинации на этой поверхности  $s_2 \rightarrow \infty$ . С учетом этих допущений, выражение (6) упрощается до вида

$$\Delta n(W) = \frac{(1-R)\Phi\alpha\tau}{\alpha L + 1} \frac{1 + \frac{s_1 W}{D}}{s_1 + \frac{D}{L}} \quad (7)$$

Сравнивая с (5) и учитывая, что для рассматриваемых образцов  $\frac{s_1 W}{D} \ll 1$ , получаем

$$V_s = \frac{(1-R)\Phi\alpha\tau}{s_1 + \frac{D}{L}} \frac{\alpha L}{1 + \alpha L q n_0} \frac{kT}{q} \quad (8)$$

Уравнение (8) позволяет, зная часть параметров образца, определять неизвестные параметры по результатам измерения потенциала поверхности зарядочувствительным измерительным преобразователем на основе вибрирующего зонда Кельвина.

Структурная схема измерительной установки для неразрушающего контроля свойств функциональных материалов, реализующей данную методику, приведена на рисунке 1. В процессе измерения параметров пространственного распределения электрического потенциала  $V_s$  производится двухкоординатное механическое перемещение (сканирование) отсчетного электрода над рабочей стороной объекта контроля с поддержанием зазора между зондом и исследуемой поверхностью в районе 0,1...0,5 мм. В соответствии с алгоритмом выбора модели объекта измерения предусмотрена возможность воздействия на образец различными факторами, помимо освещения: коронным разрядом (для диэлектриков и образцов с диэлектрическим покрытием), нагревом (для полупроводниковых и некоторых композитных материалов). Ввод массива данных в персональный компьютер и его дальнейшая обработка соответствующими программами позволяют получать восстановленное изображение распределения контролируемой физической величины по поверхности образца. Методика в целом характеризуется

высокой чувствительностью и позволяет регистрировать свойства тонкого поверхностного слоя на достаточно большой площади поверхности.

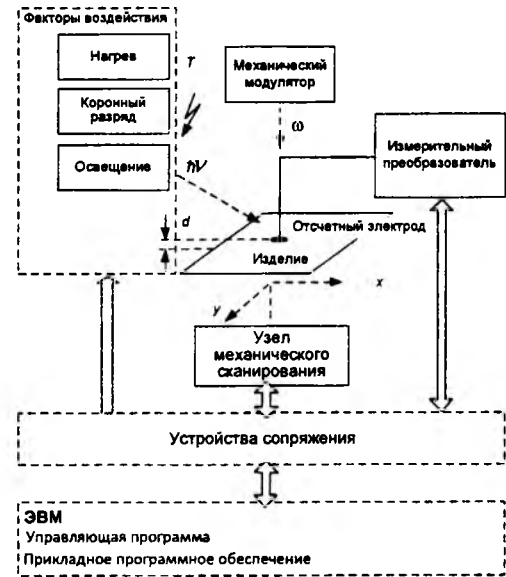


Рисунок 1 – Структурная схема установки для контроля изделий с использованием методики многопараметрических измерений.

1. Федоров В.К., Сергеев Н.П., Кондрашин А.А. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств. – Москва: Техносфера, 2005. – 504 с.
2. Воробей Р.И., Гусев О.К., Жарин А.Л., Свистун А.И., Тявловский А.К., Тявловский К.Л. Методология и средства измерений параметров объектов с неопределенными состояниями. – Минск: БНТУ, 2010. – 586 с.
3. Schroder D.K. Semiconductor Material and Device Characterization (2nd edn.). – New York: Wiley-Interscience. – 1998. – Pp. 485–487.
4. Pierret R. F. Semiconductor Device Fundamentals. – Reading, MA: Addison-Wesley. – 1996.

УДК 53.082.722.4

## БЕСКОНТАКТНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПОВЕРХНОСТНОЙ ФОТОЭДС НА ОСНОВЕ СТАТИЧЕСКОГО КОНДЕНСАТОРА

Воробей Р.И.<sup>1</sup>, Жарин А.Л.<sup>1</sup>, Мухуров Н.И.<sup>2</sup>, Колтунович Т.Н.<sup>3</sup>, Дубаневич А.В.<sup>1</sup>, Тявловский А.К.<sup>1</sup>, Тявловский К.Л.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ГНУ «Институт физики НАН Беларуси», Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Люблинский технический университет, Люблин, Польша

Разработанный электрометрический зарядочувствительный измерительный преобразователь обеспечивает оценку основных параметров и контроль качества полупроводниковых слоев оптоэлектронных устройств неразрушающим способом. Преобразователь является бес-

контактным и обеспечивает возможность выполнения контроля непосредственно в технологическом процессе изготовления оптоэлектронного устройства

В состав зарядочувствительного измерительного преобразователя, схема которого при-

ведена на рисунке 1, дополнительно введен импульсный источник оптического излучения, обеспечивающего возбуждение контролируемой оптоэлектронной структуры. Зарядочувствительный измерительный преобразователь обеспечивает бесконтактное измерение величины возникающего при этом заряда поверхности. Импульс оптического излучения обеспечивает возбуждение электронов в валентной зоне полупроводника, что приводит к их переходу в зону проводимости при условии, что энергия квантов оптического излучения превышает ширину запрещенной зоны хотя бы для одной из структур в освещенной области. Переход электронов в зону проводимости приводит к разделению зарядов в полупроводнике: в зоне проводимости возникает избыток отрицательно заряженных электронов, а в валентной зоне – избыток положительно заряженных дырок. Различие в подвижности электронов и дырок приводит к их пространственному разделению, следствием чего является возникновение в образце электрического поля, формирующего значение потенциала поверхности, которое зависит от свойств и характеристик контролируемого материала.

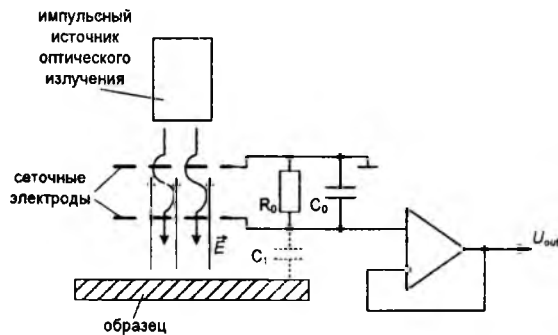


Рисунок 1 – Схема зарядочувствительного измерительного преобразователя для контроля функциональных материалов с фотоэлектрическими свойствами

Для регистрации этого электрического поля чувствительный элемент зарядочувствительного измерительного преобразователя выполнен в виде двух сеточных электродов, один из которых (верхний) заземлен, а второй подключен к высокоомному входу неинвертирующего усилителя. Исполнение электродов в виде сеток позволяет оптическому излучению практически беспрепятственно достигать поверхности функционального материала. Между нижним сеточным электродом и поверхностью образца имеется емкостная связь  $C_1$ .

Взаимная емкость  $C_0$  сеточных электродов в предложенной конструкции составляет около 10...50 пФ, требуемое входное активное сопротивление усилителя  $R_0$  – от 100 ГОм до 1 ТОм. Это связано с тем, что величина выходного тока

такого зарядочувствительного измерительного преобразователя очень мала (менее  $10^{-12}$  А) и реализация метода возможна только с использованием операционных усилителей (ОУ) со сверхмалыми входными токами. В связи с этим в базовом варианте лабораторного образца измерительного преобразователя использован ОУ AD 549L с входным током менее 60 фА. Отметим, что рекордно низкое значение входного тока 3 фА достигнуто у ОУ LMP 7721 (2008 г.).

Для регистрации выходного тока зарядочувствительного измерительного преобразователя целесообразно использовать трансимпедансное включение предварительного усилителя сигнала [1]. В традиционных трансимпедансных усилителях (рисунок 2) коэффициент усиления определяется сопротивлением в цепи обратной связи  $R_F$ :

$$V_o = -i_{in} \cdot R_F. \quad (1)$$

Для измерения токов фемтоамперного диапазона необходимо очень большое значение резистора в цепи обратной связи  $R_F$ . Например, для получения милливольтного отклика от входного тока равного 1 фемтоамперу необходимо использование резистора  $R_F$ , равного 1 тераому, что практически трудно осуществимо.

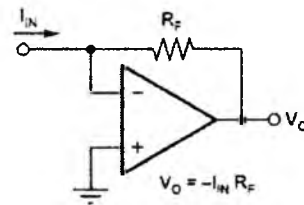


Рисунок 2 — Традиционный трансимпедансный усилитель

Получение требуемой чувствительности по току без высокоомных резисторов возможно при использовании интегрирующих трансимпедансных усилителей (рисунок 3). Входной ток протекает через интегрирующий конденсатор  $C_{INT}$  в петле обратной связи операционного усилителя, заряжая его до уровня, пропорционального входному току.

При постоянном входном токе выходное напряжение интегрирующего трансимпедансного усилителя за время интегрирования  $T_{INT}$  будет:

$$U_o = -i_{in} \frac{T_{INT}}{C_{INT}}. \quad (2)$$

Таким образом,  $V_o$  будет пропорционально времени интегрирования  $T_{INT}$  и обратно пропорционально емкости конденсатора в цепи обратной связи, а эффективный коэффициент усиления  $\frac{T_{INT}}{C_{INT}}$ . При этом интегрирование уменьшает шум путем усреднения входного шума датчика, усилителя и внешних паразитных наводок.

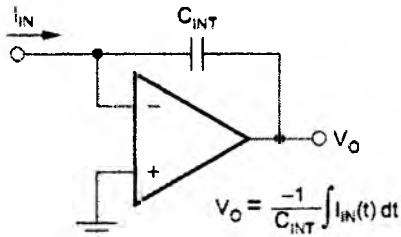


Рисунок 3 – Интегрирующий трансимпедансный усилитель

Интегрирующему трансимпедансному усилителю для нормального функционирования требуется периодическая разрядка интегрирующего конденсатора, для чего используются прецизионные электронноуправляемые ключи.

С учетом высокого входного импеданса интегрирующего трансимпедансного усилителя, связь между электродами оказывается практически чисто емкостной. Ток в такой цепи может протекать только при условии изменения заряда неземленной обкладки  $Q_1$ :

$$i = \frac{\partial Q_1}{\partial t}. \quad (3)$$

Источником изменения заряда является переменное электрическое поле, возникающее при воздействии на функциональный материал коротким импульсом оптического излучения. В случае, если длительность импульса много меньше постоянной времени измерительного преобразователя  $C_0 R_0$ , как это имеет место для настоящей конструкции, заряд на конденсаторе  $C_0$  не успевает достичь насыщения за время импульса, и систему «образец – электроды измерительного преобразователя» можно рассматривать как емкостной делитель. В этом случае выходной сигнал  $U_{out}$  зарядочувствительного преобразователя связан с фотоЭДС  $U_{PV}$  поверхности исследуемого образца соотношением

$$U_{out} = U_{PV} \frac{C_1}{C_1 + C_0} \approx U_{PV} \frac{C_1}{C_0} \quad (4)$$

УДК 537.58:621.891

### ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОРОННОГО РАЗРЯДА

Воробей Р.И.<sup>1</sup>, Жарин А.Л.<sup>1</sup>, Петлицкий А.Н.<sup>2</sup>, Пилипенко В.А.<sup>2</sup>, Свистун А.И.<sup>1</sup>,  
Тявловский А.К.<sup>1</sup>, Тявловский К.Л.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,

Минск, Республика Беларусь

6

Схема измерительного преобразователя для контроля параметров полупроводниковых структур с использованием коронного разряда и бесконтактной регистрации потенциала поверхности приведена на рисунке 1. Преобразователь включает в себя две основных части: узел воз-

с учетом малой относительной величины  $C_1$ .

Таким образом, зная параметры конструкции зарядочувствительного преобразователя  $C_0$  и  $C_1$ , из (4) можно найти численное значение отклика исследуемого материала на оптическое излучение. При использовании калиброванного источника оптического излучения (например, полупроводникового лазера) с известной величиной потока оптического излучения  $\Phi$ , можно определить такие параметры материала, как фототок короткого замыкания  $I_{SC}$ , емкость структуры  $C$ , фотоЭДС холостого хода  $U_{OC}$ , параллельное  $R_{sh}$  и последовательное  $R_s$  сопротивления фоточувствительной структуры.

Непосредственно после начала оптического импульса, когда напряжение  $U_{PV}$  еще не достигло насыщения, скорость его нарастания пропорциональна фототоку короткого замыкания и электрической емкости структуры:

$$\frac{\partial U_{PV}}{\partial t} = I_{SC} C. \quad (5)$$

При достижении насыщения фотоЭДС  $U_{PV}$  исследуемого материала принимает значение, равное фотоЭДС холостого хода  $U_{OC}$ . Наконец, после окончания импульса оптического излучения фотоЭДС  $U_{PV}$  начинает спадать за счет разрядки конденсатора  $C$  через последовательное сопротивление структуры  $R_s$ . Постоянная времени этого спада прямо пропорциональна произведению  $R_s C$ . Таким образом, анализ выходного сигнала предлагаемого зарядочувствительного измерительного преобразователя дает практически полную характеристику функционального материала с фотоэлектрическими свойствами.

1. Тявловский, А.К., Жарин, А.Л. Применение трансимпедансных предусилителей в измерителях контактной разности потенциалов // Электроника-инфо. – 2010. – № 6. – С. 60–63.

действия на образец коронным разрядом, обеспечивающий контролируемое заряджение поверхности структуры кремний-диэлектрик, и измерительный узел, обеспечивающий измерение потенциала поверхности с помощью бесконтактного зонда Кельвина. Оба узла смонти-