

5. Mikailov, F.A. Time-dependent dielectric behaviour in incommensurate TlInS_2 crystal / F.A. Mikailov // Crystal Research and Technology. – 2009. – V. 44. N 1. – P. 82–86.
6. Panich, A.M. Electronic Properties and Phase Transitions in Low-dimensional Semiconductors / A.M. Panich // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2008. – V. 20. N 29. – P. 1–42.
7. Диэлектрические свойства и фазовые переходы в кристаллах твёрдых растворов $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ / А.У. Шелег [и др.] // Физика твердого тела. – 2012. – Т. 54. №3. – С. 581–584.

БЕСКОНТАКТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В КРЕМНИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СПЕКТРАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ФОТОЭДС

А. Л. Жарин, О. К. Гусев, А. К. Тявловский,
К. Л. Тявловский, Р. И. Воробей, К. В. Пантелеев

Белорусский национальный технический университет, nil_pt@bntu.by

Время жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ) является одной из универсальных физических характеристик полупроводникового материала. С точки зрения электрических характеристик формируемых полупроводниковых структур предпочтительными являются большие значения времени жизни ННЗ, таким образом, данный параметр в определенной степени характеризует качество полупроводника.

Рассматриваемая методика контроля основывается на измерении контактной разности потенциалов (КРП) поверхности полупроводниковой пластины методом Кельвина-Зисмана в сканирующем режиме. Измерения осуществляются без непосредственного механического контакта измерительного преобразователя (зонда) с поверхностью и при нормальном атмосферном давлении. Освещение поверхности полупроводника оптическим излучением с энергией квантов, превышающей ширину запрещенной зоны, приводит к увеличению концентрации ННЗ в приповерхностной области, что в свою очередь приводит к изменению потенциала поверхности V_S , регистрируемому по изменению КРП V_P (эффект поверхностной фотоЭДС.) в соответствии с выражением [1]:

$$V_P = \frac{kT}{q} \frac{(1-r)\Phi}{n_0 \left(s_1 + \frac{D_n}{L_n} \right)} \frac{L_n}{L_n + \frac{1}{\alpha}}, \quad (1)$$

где n_0 – равновесная концентрация электронов в полупроводнике; q – элементарный заряд (заряд электрона); k – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура; r – коэффициент отражения поверхности; α – коэффициент поглощения оптического излучения; L_n – длина диффузии ННЗ; D_n – коэффициент диффузии ННЗ; s_1 – скорость рекомбинации носителей заряда на границе ОПЗ; Φ – плотность мощности оптического излучения.

Коэффициент поглощения α в выражении (1) является функцией длины волны падающего излучения. Выполнив измерения для нескольких длин волн с различными коэффициентами поглощения $\alpha(\lambda)$, можно получить график зависимости обратной величины поверхностной фотоЭДС $1/V_P$ от обратной величины коэффициента поглощения $1/\alpha$. При условии независимости остальных величин в выражении (1)

от длины волны λ такой график будет представлять собой прямую линию, причем точка ее пересечения с осью абсцисс $1/V_p = 0$ соответствует условию $1/\alpha = -L_n$. Это позволяет определить длину диффузии НЗ L_n на основании результатов двух последовательных измерений поверхностной фотоэдс. на двух различных длинах волн λ_1 и λ_2 в соответствии с выражением

$$L_n = \frac{\alpha(\lambda_1)V_p(\lambda_2) - \alpha(\lambda_2)V_p(\lambda_1)}{\alpha(\lambda_1)\alpha(\lambda_2)(V_p(\lambda_2) - V_p(\lambda_1))}. \quad (2)$$

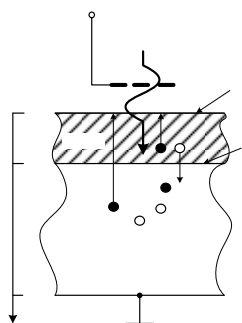
Зная коэффициент диффузии D_n , рекомбинационное время жизни НЗ τ_r , можно вычислить по формуле

$$\tau_r = \frac{L_n^2}{D_n}. \quad (3)$$

Алгоритм измерений согласно предложенной методике предусматривает выполнение следующих операций:

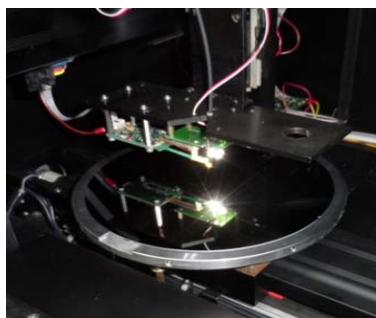
1. Измерение КРП в выбранной точке поверхности образца в условиях затемнения поверхности.
2. Освещение поверхности монохроматическим светом заданной интенсивности и длины волны.
3. Измерение КРП освещенной поверхности.
4. Вычисление поверхностной фотоЭДС как разности КРП поверхности в условиях освещения и затемнения.
5. Повторение пунктов 1-4 для второго значения длины волны.
6. Вычисление длины диффузии и/или времени жизни НЗ по формулам (2) и (3).

Выражение (2), в отличие от выражения (1), не содержит физических параметров полупроводникового материала, что позволяет выполнять измерения в соответствии с предложенной методикой в отсутствие априорной информации об объекте измерений. При создании измерительного преобразователя (рис. 1) в качестве λ_1 и λ_2 были выбраны значения 574 нм и 470 нм.



ОПЗ – область пространственного заряда;
●, ○ – электроны и дырки, соответственно.

а



б

Рисунок 1. – Принцип бесконтактных измерений времени жизни НЗ на основе регистрации поверхностной фотоЭДС (а) и внешний вид измерительного преобразователя на основе бесконтактного зонда Кельвина (б)

Выбор определялся требованиями к минимальной энергии квантов и существенным различием коэффициентов поглощения на данных длинах волн. Для исключения электромагнитных помех ввод оптического излучения осуществляется посредством световода от удаленных светодиодных источников излучения.

Малогабаритный электрометрический зонд Кельвина диаметром 0,8 мм совмещен с двухкоординатной сканирующей системой, что позволяет не только определять значения времени жизни ННЗ в выбранных точках образца, но и исследовать пространственное распределение данного параметра по всей поверхности полупроводниковой пластины. Результаты исследования представляются в виде визуализированной картины распределения длины диффузии или времени жизни ННЗ с обозначением контролируемого параметра условными индексными цветами (рис. 2).

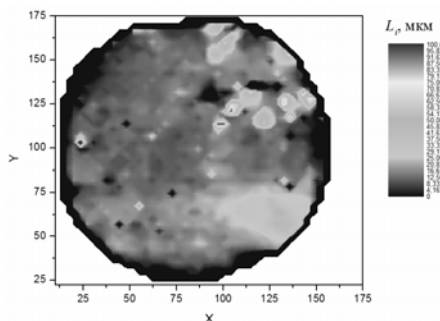


Рисунок 2. – Пример визуализации пространственного распределения длины диффузии ННЗ по поверхности кремниевой пластины диаметром 150 мм

Сопоставление результатов, полученных с использованием предложенной методики, с результатами традиционных методов измерений на основе исследования $C-V$ характеристик, выполненных на базе ОАО «Интеграл», показало, что в целом результаты измерений сравнимы и хорошо коррелируют между собой. В то же время, полученные на основе анализа спектральной зависимости поверхностной фотоЭДС значения времени жизни ННЗ во всех случаях оказались существенно большими, чем при использовании традиционной CV -метрии. Это может объясняться, как наличием неучтенных методических погрешностей, связанных, в частности, с зависимостью скорости поверхностной рекомбинации от потенциала поверхности, так и отличием состояния поверхности в процессе измерений: традиционный метод исследования $C-V$ характеристик предусматривает формирование временного или постоянного металлического затвора непосредственно на поверхности полупроводниковой пластины, что может привести к нарушению поверхности и сокращению времени жизни ННЗ, тогда как рассматриваемая методика является бесконтактной. При этом визуализация пространственного распределения времени жизни ННЗ по всей поверхности пластины позволяет эффективно выявлять места локализации дефектов независимо от погрешности определения количественного значения данного параметра, что определяет высокую эффективность предложенного метода в неразрушающем контроле дефектов поверхности полупроводниковых пластин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Measurement of the minority-carrier diffusion length in thin semiconductor films / C.L. Chiang [et al.] // IEEE Trans. Electron Devices. – 1986. – No. 33. – P. 1587–1592.