

Попов С. А., Озаренко А. В.

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛЕВЫХ СТРУКТУР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Работа выполнена под руководством к.т.н., проф. Брусенцова Ю. А.

ГТУ, Кафедра «Материалы и технология»

Неотъемлемой составной частью измерительных приборов и систем являются датчики. Поэтому создание первичных измерительных преобразователей (ПИП) с более высокими метрологическими характеристиками – первоочередная и актуальная задача современного приборостроения.

Применение полупроводниковых преобразователей в качестве альтернативы традиционным ПИП позволяет существенно расширить возможности измерительных устройств.

Основными преимуществами полупроводниковых ПИП являются:

- высокое быстродействие,
- повышенная чувствительность,
- совместимость с интегральной технологией,
- малые размеры,
- высокая временная и температурная стабильность.

В данной работе предлагается математическая модель процессов протекающих в полупроводнике при воздействии механических деформаций.

Известна формула:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

где σ - механическое напряжение, E – модуль упругости, ε - механическая деформация.

Относительное изменение сопротивления ПИП при изменении деформации выражается следующей зависимостью [2]:

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon \cdot S, \quad (2)$$

где S - чувствительность ПИП к деформации, R – сопротивление ПИП. Из формул (1) и (2) получим выражение для модуля упругости:

$$E = \frac{R}{\Delta R} \cdot \sigma \cdot S. \quad (3)$$

Известно, что при деформации полупроводникового кристалла изменяется подвижность носителей заряда. В неполярных полупроводниках (германий, кремний) основными механизмами, определяющими подвижность носителей, являются рассеяние на акустических фононах и рассеяние на ионизированных примесных атомах. Значение подвижности, определяемой рассеянием на акустических фононах, с учетом формулы (3), определяется следующим выражением [1]:

$$\mu_l = \frac{\sqrt{8 \cdot \pi} \cdot q \cdot \hbar^4 \cdot \frac{R}{\Delta R} \cdot \sigma \cdot S}{3 \cdot E_{ds} \cdot m^{*2} \cdot (k \cdot T)^{\frac{3}{2}}}, \quad (4)$$

где q - заряд носителей, E_{ds} - смещение края зоны проводимости на единицу деформации кристаллической решетки, m^* - эффективная масса электрона.

Подвижность, обусловленная рассеянием на ионизированных атомах примеси определяется выражением [1]:

$$\mu_i = \frac{64 \cdot \sqrt{\pi} \cdot \varepsilon_s^2 \cdot (2 \cdot k \cdot T)^{\frac{3}{2}}}{N_1 \cdot q^3 \cdot m^{*2}} \left\{ \ln \left[1 + \left(\frac{12 \cdot \pi \cdot \varepsilon_s \cdot k \cdot T}{q^2 \cdot N_1^{\frac{1}{3}}} \right)^2 \right] \right\}^{-1}, \quad (5)$$

где N_1 - концентрация ионизированных примесей, ε_s - диэлектрическая проницаемость. Результирующая подвижность выражается формулой [1]:

$$\mu = \left(\frac{1}{\mu_l} + \frac{1}{\mu_i} \right)^{-1}. \quad (6)$$

Взаимодействие акустических волн с электронами проводимости в полупроводниках обусловлено тем, что смещение атомов кристаллической решетки, вызванное ультразвуковой волной, приводит к изменению

ям внутрикристаллических электрических полей, которые и оказывают влияние на движение электронов проводимости [4].

Под действием ультразвуковой волны образуются области пониженной и повышенной плотности зарядов, между которыми возникает электрическое поле, действующее на электроны проводимости. Сила потенциал - деформационного взаимодействия определяется по формуле [4]:

$$F = k^2 \cdot D \cdot u, \quad (7)$$

где D_{ik} - константа потенциал - деформационного взаимодействия, которая является тензором и в свою очередь зависит от направления распространения и поляризации звуковой волны, u - амплитуда смещения частиц в акустической волне. Видно, что сила взаимодействия пропорциональна квадрату волнового вектора звуковой волны k , т. е. квадрату частоты.

Действие сил непосредственного воздействия акустической волны на электрон проводимости вызывает электронные токи, которые в свою очередь приводят к появлению новых электромагнитных полей, уменьшающих силу F . Эти токи как бы экранируют силу электрон-фононного взаимодействия. Отличие результирующей силы электрон-фононного взаимодействия F_p от силы F определяется частотой акустической волны ω и проводимостью кристалла δ и находится по формуле [4]:

$$F_p = F \left(1 + i \frac{4 \cdot \pi \cdot \delta}{\omega} \right)^{-1}. \quad (8)$$

Выходной ток полупроводниковой структуры:

$$I = j \cdot S, \quad (9)$$

где I – ток, j - плотность тока, S - площадь поперечного сечения канала.

Плотность тока определяется выражением:

$$j = \delta \cdot E_0, \quad (10)$$

где E_0 - напряженность внешнего поля.

Для проводимости кристалла известна следующая формула:

$$\delta = n \cdot q \cdot \mu, \quad (11)$$

где n - концентрация носителей заряда.

Площадь поперечного сечения канала находится как:

$$S = x \cdot z, \quad (12)$$

где x и z - глубина и ширина канала.

Напряженность внешнего поля выразим через результирующую силу электрон-фононного взаимодействия и заряд:

$$E_0 = \frac{F_p}{q}. \quad (13)$$

Используя приведенные выше формулы, выражение (9) можно привести к следующему виду:

$$I = x \cdot z \cdot n \cdot \frac{4 \cdot \pi^2}{\lambda^2} \cdot D \cdot u \cdot \left(1 - i \frac{4 \cdot \pi \cdot \delta}{\omega}\right)^{-1} \cdot \left(\frac{3 \cdot E_{ds} \cdot m^{*\frac{5}{2}} \cdot (k \cdot T)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{8 \cdot \pi} \cdot q \cdot \hbar^4 \cdot \frac{R}{\Delta R} \cdot \sigma \cdot S} + \frac{N_1 \cdot q^3 \cdot m^{*\frac{1}{2}}}{64 \cdot \sqrt{\pi} \cdot \varepsilon_s^2 \cdot (2 \cdot k \cdot T)^{\frac{3}{2}}} \cdot \ln \left[1 + \left(\frac{12 \cdot \pi \cdot \varepsilon_s \cdot k \cdot T}{q^2 \cdot N_1^{\frac{1}{3}}} \right)^2 \right] \right)^{-1} \quad (14)$$

Таким образом, в результате синтеза основных соотношений получена математическая модель, позволяющая определить механическое напряжение по выходному току полевой структуры.

Список литературы

1. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. Книга 1. М.: Мир, 1984. – 456 с.
2. Клокова Н.П., Лукашник В.Ф., Волчек А.В. Тензодатчики для экспериментальных исследований. М.: Машиностроение, 1972. – 150 с.
3. Koroljev A.P., Shelokhvostov V.P., Chernyshov V.N. Semiconductor Primary Initial Transformer Design for Heat Values Measurement. Tambov: Transactions of Tambov State Technical University, 1999, v.5, №4, p. 536-542.
4. Голямина И. П. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.