

3. Лесун, А.Н. Физико-механические характеристики композитов на основе ПТФЭ и его регенерата в процессе формирования изделий /А.Н. Лесун // Инженерное и экономическое обеспечение деятельности транспорта и машиностроения : сб. науч. ст. по материалам Междунар. науч. конф. молодых учёных, Гродно, 25–26 мая 2017 г. – Гродно : ГрГУ им. Янки Купалы, 2017. – С. 56–59.

УДК 537.633.2

В.Р. Мадьяров

Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

ОЦЕНКА СКОРОСТИ ПОВЕРХНОСТНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИКРОСТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА МАГНИТОПЛАЗМЕННОГО ОТРАЖЕНИЯ

Аннотация. В данной работе предлагается оценивать скорость поверхностной рекомбинации в плоском n -Si в стационарном режиме по измеренным значениям интенсивности фотовозбуждающего источника (лазерного диода) и концентрации носителей заряда в приповерхностной области полупроводникового слоя. Концентрация носителей в приповерхностной облучаемой области полупроводниковой пластины определялась по резонансным частоте магнетоплазменного поглощения зондирующего излучения миллиметрового диапазона, при которой наблюдается минимальное пропускание.

V.R. Madiyarov

Belarusian State Technological University
Minsk, Belarus

ESTIMATION OF THE SURFACE RECOMBINATION RATE IN SEMICONDUCTOR MICROSTRUCTURES BASED ON THE EFFECT OF MAGNETOPLASMIC REFLECTION

Abstract. In this paper, it is proposed to estimate the rate of surface recombination in a flat n -Si in stationary mode from the measured values of the intensity of the photoexciting source (laser diode) and the concentration of charge carriers in the near-surface region of the semiconductor layer. The carrier concentration in the near-surface irradiated region of the semiconductor wafer was determined by the resonant frequency of magnetoplasmic absorption of the probing radiation in the millimeter range, at which minimal transmission is observed.

Определение интенсивности процессов рекомбинации на поверхности полупроводника является одной из основных задач при создании электронных приборов на основе микро- и нано структур. Для изучения поверхностной рекомбинации обычно применяется импульсная ионизация полупроводника, монохроматическим излучением, с последующей регистрацией отраженной от этой поверхности СВЧ- волны. Разделение объемного и поверхностного процессов рекомбинации обеспечивается на основе значительного различия их скоростей [1,2]. Разработан также бесконтактный, неразрушающий метод измерений рекомбинационных параметров в пластинах Si на основе анализа кинетики релаксации избыточного теплового излучения пластины за краем собственного поглощения Si [3].

Для интерпретации результатов измерений требуется использование дополнительных данных о коэффициентах переноса носителей и динамике рекомбинации. В данной работе предлагается оценивать скорость поверхностной рекомбинации S в стационарном режиме по измеренным значениям интенсивности фотовозбуждающего источника и концентрации неравновесных носителей.

Если известна избыточная концентрация Δn_s носителей заряда в приповерхностной области образца, то скорость поверхностной рекомбинации S можно оценить по формуле

$$S = \frac{q_s}{n_s} = \frac{I_s(1-R)}{h\nu\Delta n_s}, \quad (1)$$

где q_s ($\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$) – поверхностная плотность избыточных носителей заряда, образующихся за 1 с в результате фотовозбуждения; I_s – интенсивность источника; R – коэффициент отражения фотовозбуждающего излучения от образца, ν – его частота.

При облучении образца источником возрастают проводимость и диэлектрическая проницаемость в приповерхностной области образца, которые зависят от концентрации носителей. В результате изменяются коэффициенты отражения и, соответственно, пропускания зондирующего излучения. Для определения приповерхностной концентрации n_s использовалась зависимость коэффициента пропускания от частоты. На частоте зондирования, равной плазменной ω_p , пропускание достигает минимума. При уровне концентраций неравновесных носителей $\sim 10^{19} - 10^{21} \text{ м}^{-3}$ плазменная частота находится в диапазоне зондирования 10 – 100 ГГц. Концентрацию носителей заряда в приповерхностной области образца можно определить по частоте, соответствующей минимальному пропусканию

зондирующего СВЧ – излучения. Однако плавное изменение частоты зондирования в широком диапазоне для достижения плазменного резонанса является технически сложной задачей. Применение вспомогательного магнитного поля, в которое помещается образец, приводит к магнитоплазменному резонансу, который может достигаться при изменении магнитной индукции и, соответственно, циклотронной частоты ω_c .

Для измерений была выбрана конфигурация с магнитным полем, направленным поперек направления распространения зондирующей волны. При использовании такой геометрии в области образца может создаваться гораздо более сильное магнитное поле, чем при параллельном направлении поля и волны.

Для плоской синусоидальной волны, распространяющейся вдоль оси z . в магнитном поле, направленном перпендикулярно z , уравнения для проекций напряженности электрического поля волны E_x и E_y примут вид:

$$\begin{cases} \left(k^2 - \varepsilon \frac{\omega^2}{c^2}\right) E_x + i\mu_0\omega(\sigma_{xx} E_x + \sigma_{xy} E_y) = 0, \\ \left(\varepsilon \frac{\omega^2}{c^2} - i\mu_0\omega\sigma_{xx}\right) E_y + i\mu_0\omega\sigma_{xy} E_x = 0. \end{cases} \quad (2)$$

где k – модуль волнового вектора; ε – диэлектрическая проницаемость полупроводника; c – скорость электромагнитной волны в вакууме, μ_0 – магнитная постоянная, σ_{xx} – проводимость, обусловленная дрейфом носителей под действием электрического поля зондирующей волны, σ_{xy} – холловская проводимость полупроводникового образца, вызванная взаимодействием тока проводимости с постоянным магнитным полем с индукцией B . Компоненты σ_{xx} и σ_{xy} в приближении сферических энергетических поверхностей определяются соотношениями [4]:

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_0 \tau^{-1} \frac{\tau^{-1} + i\omega}{(\tau^{-1} + i\omega)^2 + \omega_c^2}, \\ \sigma_{xy} = -\sigma_{yx} = \sigma_0 \tau^{-1} \frac{\omega_c}{(\tau^{-1} + i\omega)^2 + \omega_c^2}, \end{cases} \quad (3)$$

где σ_0 – удельная электропроводность в постоянном электрическом поле; τ – время релаксации импульса; $\omega_c = eB / m^*$ – циклотронная частота; m^* – эффективная масса носителей заряда.

Из уравнений (2) и (3) следует выражение для диэлектрической проницаемости полупроводника через характерные частоты:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_s} = 1 + \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2 \left(1 + \frac{\omega_c^2}{\omega^2 - \omega_p^2 - \omega_c^2}\right), \quad (4)$$

где $\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{\epsilon_s \epsilon_0 m^*}}$ – плазменная частота; ϵ_s – диэлектрическая проницаемость в постоянном поле; n – концентрация носителей заряда в полупроводнике.

Из (4) следует, что минимальное пропускание полупроводникового образца соответствует резонансной частоте:

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_p^2 + \omega_c^2}, \quad (5)$$

которая зависит от концентрации носителей и от магнитной индукции.

Из уравнения (5) следует формула для определения концентрации в приповерхностной (облучаемой) области образца:

$$\omega_0^2 = \omega_c^2 + \frac{ne^2}{\epsilon \epsilon_0 m^*}, \quad (6)$$

где $\omega_c = (eB_0/m^*)$ – циклотронная частота; B_0 – индукция магнитного поля, при которой наблюдается минимальное пропускание. Схема установки представлена на рис.1.

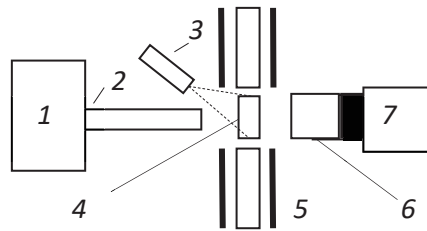


Рис.1- Экспериментальная установка: 1 – СВЧ генератор (Г4-142); 2 – волновод; 3 – лазер; 3 – образец; 5 – электромагнит; 6 – полупроводниковая термопара; 7– микровольтметр

Образец в виде квадратной пластинки n-Si со стороной 8 мм помещался в зазор электромагнита. Толщина пластинки 0,5 мм. Для фотовозбуждения кремниевой пластины n-Si применялось излучение лазерного диода с длиной волны 0,96 мкм (мощность ~ 4 мВт).

Магнитное поле в области образца, направленное перпендикулярно ионизирующему и зондирующему излучению, создавалось электромагнитом, обмотка которого питалась от регулируемого источника постоянного тока. Индукция магнитного поля могла изменяться до 0,9 Тл.

Для зондирования использовалось излучение от генератора Г4-142. Сигнал, пропорциональный мощности прошедшего через образец зондирующего излучения, регистрировался полупроводниковой термопарой, подключенной к микровольтметру Ф136 с предельной чувствительностью 100 нВ/дел.

Измерения сигнала с проводились в диапазоне частот 65–75 ГГц. На каждой из зондирующих частот магнитное поле в области образца изменялось в пределах от 0,4 до 0,9 Тл. Магнитоплазменный резонанс достигался путем изменения магнитной индукции с шагом 0,05 Тл на фиксированной частоте генератора.

На рис. 2 представлена характерная зависимость коэффициента пропускания зондирующего излучения от магнитной индукции на частоте 67 ГГц. Минимум отражения зондирующего излучения для данного образца наблюдался в области частот 65–69 ГГц (рабочий диапазон частот генератора 54–79 ГГц).

На рис.3 показана зависимость квадрата частоты, соответствующей минимальному пропусканию зондирующего излучения, от B_0^2 . Наблюдается линейная зависимость, что соответствует расчетной зависимости (6). Экстраполяция этой зависимости на значение $B = 0$ дает значение частоты $\omega_0 = 65,4$ ГГц. С использованием этих данных и значения эффективной массы для Si $1,08m_0$ получено значение концентрации носителей в образце $7 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

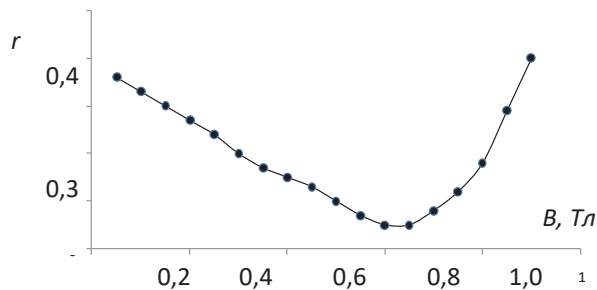


Рис. 2- Типичная зависимость коэффициента пропускания полупроводниковой пластины r от магнитной индукции на частоте зондирующего излучения 67 ГГц

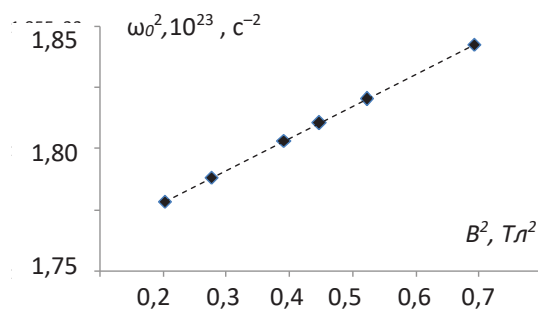


Рис. 3 - Зависимость квадрата частоты, соответствующей минимальному пропусканию зондирующего излучения, от квадрата магнитной индукции

Оценка концентрации электронов в приповерхностной облучаемой области с учетом коэффициента поглощения кремния 10^2

м^{-1} на длине волны фотовозбуждающего излучения (0,96 мкм) дает значение, которое может отличаться от полученного из рассмотренных выше частотных измерений примерно на 2%. Значение скорости поверхностной рекомбинации, рассчитанное по формуле (1) при $I_s = 4 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$, составляет 25 м/с. При расчетах полагалось, что излучение фотовозбуждающего лазерного диода в плоскости образца образует конус с площадью около 1 см^2 .

Предлагаемая методика не требует использования данных о коэффициенте диффузии и объемном времени жизни носителей и может быть полезной для определения скорости поверхностной рекомбинации при использовании излучений миллиметрового диапазона.

Список использованных источников

1. Palais O., Arcari A. Contactless measurement of bulk lifetime and surface recombination velocity in silicon wafers // J. Appl. Phys. – 2003. – vol. 93. – no. 8. – pp. 4686–4690.

2. Separation of the bulk lifetime and surface recombination velocities in semiconductor wafer by a single microwave photoconductance/ F. X. Chen et al// Semicond. Sci. and Technology. 2004. vol. 19, no. 9. P. 959–963.

3. Богатыренко В.В., Зиновчук А.В. Измерение скорости поверхностной рекомбинации и объемного времени жизни в пластинах Si по кинетике избыточного теплового излучения // Физика и техника полупроводников. 2015, Т. 45, вып. 1. С. 62 – 66.

4. Басс Ф.Г., Гуревич Ю.Г. Горячие электроны и сильные электромагнитные волны в плазме полупроводников и газового разряда. М.: Наука, 1975. 400 с.

УДК 621.791.313.5

М.Д. Мордасов, П.А. Шерстеникин, Д.М. Мордасов

Тамбовский государственный технический университет
Тамбов, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПОМОЩИ ТЕРМОВОЗДУШНОЙ ПАЙКИ

Аннотация. Проведен анализ поверхностей разрушения паяных соединений, полученных при помощи термовоздушной пайки. Выявлены дефекты характерные