

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТА МАГНИТОПЛАЗМЕННОГО
ОТРАЖЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ
ПОВЕРХНОСТНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ
В ПОЛУПРОВОДНИКАХ**

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]. В данной работе предлагается оценивать скорость поверхностной рекомбинации в n-Si в стационарном режиме по измеренным значениям интенсивности фотовозбуждающего источника и концентрации носителей заряда в приповерхностной области полупроводникового слоя. Для фотовозбуждения кремниевой пластины n-Si с толщиной 0,5 мм применялось излучение лазерного диода. Концентрация носителей в приповерхностной облучаемой области полупроводниковой пластины определялась по резонансным частоте магнитоплазменного поглощения зондирующего излучения миллиметрового диапазона, при которой наблюдается минимальное пропускание. Показано, что данная частота включает в себя плазменную и циклотронную составляющие. Резонанс достигался с путем изменения индукция поперечного магнитного поля в области образца на фиксированной частоте зондирования. Значение скорости поверхностной рекомбинации, рассчитанное с использованием резонансных значений частоты и магнитной индукции и, составляет 25 м/с, что находится в удовлетворительном соответствии с известными данными. Предлагаемая методика не требует использования данных о коэффициенте диффузии и объемном времени жизни носителей и может быть полезной для определения скорости поверхностной рекомбинации с использованием излучений миллиметрового диапазона.

Для интерпретации результатов измерений требуется использование дополнительных данных о коэффициентах переноса носите-

лей 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

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.

Из уравнения для проекций напряженности электрического поля волны следует выражение для диэлектрической проницаемости полупроводника через характерные частоты [4]:

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

где $\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{\varepsilon_s \varepsilon_0 m^*}}$ – плазменная частота; ε_s – диэлектрическая проницаемость в постоянном поле; n – концентрация носителей заряда в полупроводнике.

Из (2) следует, что минимальное пропускание полупроводникового образца соответствует резонансной частоте:

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_p^2 + \omega_c^2}, \quad (3)$$

которая зависит от концентрации носителей и от магнитной индукции.

Из уравнения (3) следует формула для концентрации в приповерхностной (облучаемой) области образца:

$$\omega_0^2 = \omega_c^2 + \frac{ne^2}{\varepsilon\varepsilon_0 m^*}, \quad (4)$$

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

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).

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

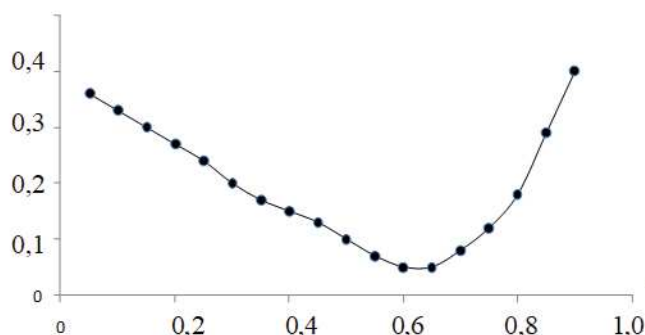


Рисунок 2 – Типичная зависимость коэффициента пропускания полупроводниковой пластины от магнитной индукции на частоте зондирующего излучения 67 ГГц

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.

ЛИТЕРАТУРА

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.