

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 537.633.2

В. Р. Мадьяров

Белорусский государственный технологический университет

ПРИМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТА МАГНИТОПЛАЗМЕННОГО ОТРАЖЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ПОВЕРХНОСТНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

В данной работе предлагается оценивать скорость поверхностной рекомбинации в *n*-Si в стационарном режиме по измеренным значениям интенсивности фотовозбуждающего источника и концентрации избыточных носителей заряда в приповерхностной области полупроводникового слоя. Для фотовозбуждения кремниевой пластины *n*-Si толщиной 0,5 мм применялось излучение лазерного диода. Концентрация носителей в приповерхностной облучаемой области полупроводниковой пластины определялась по резонансной 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 путем изменения индукции поперечного магнитного поля в области образца на фиксированной частоте зондирования. Значение скорости поверхностной рекомбинации, рассчитанное с использованием резонансных значений частоты и магнитной индукции, составляет 25 м/с, что находится в удовлетворительном соответствии с известными данными. Предлагаемая методика не требует данных о коэффициенте диффузии и объемном времени жизни носителей и может быть полезной для определения скорости поверхностной рекомбинации с использованием излучений миллиметрового диапазона.

Ключевые слова: волны миллиметрового диапазона, магнитоплазменное отражение, концентрация носителей, поверхностная рекомбинация.

V. R. Mad'yarov

Belarusian State Technological University

MEASUREMENT OF SURFACE RECOMBINATION VELOCITY IN SEMICONDUCTORS USING MAGNETOPLASMA REFLECTION EFFECT

In this paper the method is proposed to estimate surface recombination velocity in *n*-Si in terms of the measured values of the intensity of the photoexciting light and the charge carrier concentration in the near-surface region of the semiconductor wafer. Laser diode radiation is used to excite an 0.5 mm *n*-Si silicon wafer. The carrier concentration in the near-surface irradiated region of the semiconductor wafer is determined by the magnetoplasma absorption resonant frequency of the millimeter-range probing radiation, at which the minimum transmission is observed. It is shown that this frequency includes magnetoplasma and cyclotron components. The resonance was achieved by changing the induction of the transverse magnetic field in the sample region at a fixed probing frequency. The value of the calculated surface recombination velocity, based on resonant frequency and magnetic induction values, was found to be 25 m/s, which is in satisfactory agreement with the known data. The proposed method does not require the use of data on the diffusion coefficient and volume carrier lifetime and can be useful to determine surface recombination velocity using millimeter-range radiation.

Key words: millimeter waves, magnetoplasma reflection, carrier concentration, surface recombination velocity.

Введение. Определение интенсивности процессов рекомбинации на поверхности полупроводника является одной из основных задач при создании электронных приборов на основе

микро- и наноструктур. 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 по кинетике избыточного теплового излучения 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 оценить скорость поверхностной рекомбинации S в стационарном режиме по измеренным значениям интенсивности фотовозбуждающего источника и концентрации неравновесных носителей.

Основная часть. Если известна избыточная концентрация n_s носителей заряда в приповерхностной области образца, то скорость поверхностной рекомбинации S можно рассчитать по формуле

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

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

При облучении образца излучением от внешнего источника 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 концентрациях 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, следовательно, циклотронной частоты ω_c .

Для измерений была выбрана конфигурация с постоянным 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.

Рассмотрим синусоидальную волну с частотой ω , которая распространяется вдоль оси z в прозрачной проводящей среде. Магнитное поле направлено перпендикулярно этой оси. Тогда уравнения для проекций напряженности электрического поля зондирующей волны E_x и E_y примут вид [4]:

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

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 .

Выражения для компонент σ_{xx} и σ_{xy} в приближении сферических энергетических поверхностей имеют вид [5]:

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

где σ_0 – удельная электропроводность в постоянном электрическом поле; τ – время релаксации импульса; $\omega_c = eB / m^*$ – циклотронная частота; m^* – эффективная масса носителей заряда. В данном приближении с использованием уравнений (2) и (3) в [4] получено выражение для диэлектрической проницаемости полупроводника через характерные частоты:

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

где ε_c – диэлектрическая проницаемость в постоянном поле; $\omega_p = (n_s e^2 / \varepsilon_0 \varepsilon_c m^*)^{1/2}$ – плазменная частота.

Из (4) следует, что на частоте

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

знаменатель второго слагаемого в скобках равен нулю и, следовательно, $\varepsilon = \infty$. Таким образом, частота ω_0 соответствует полному отражению. На зависимости пропускания от частоты или от магнитной индукции будет наблюдаться минимум.

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

$$\omega_0^2 = \omega_c^2 + \frac{n_s e^2}{\varepsilon \varepsilon_0 m^*}, \quad (6)$$

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

Схема установки представлена на рис. 1.

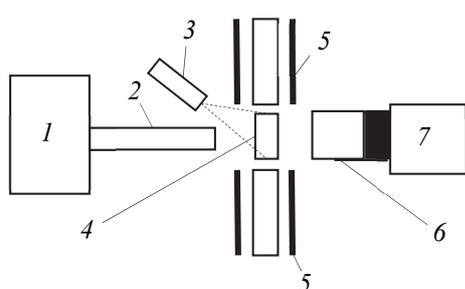


Рис. 1. Экспериментальная установка:
1 – СВЧ-генератор (Г4-142); 2 – волновод;
3 – лазерный диод; 4 – образец;
5 – обмотки и сердечник электромагнита;
6 – полупроводниковая термопара;
7 – микровольтметр

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

Магнитное поле в области образца, направленное перпендикулярно возбуждающему и зондирующему излучениям, 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 проводились в диапазоне частот 65–75 ГГц. На каждой из зондирующих частот индукция магнитного поля в области образца изменялась 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. Минимальное значение пропускания зондирующего излучения для данного образца наблюдается в области частот 65–69 ГГц (рабочий диапазон частот генератора равен 54–79 ГГц).

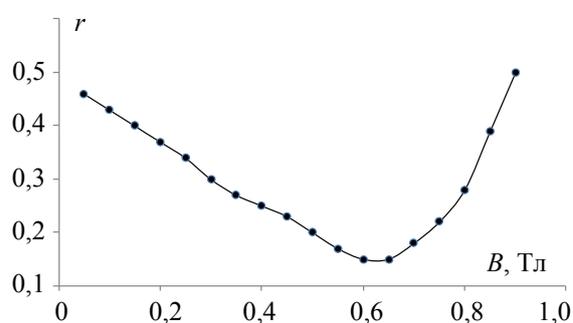


Рис. 2. Типичная зависимость коэффициента пропускания полупроводниковой пластины от магнитной индукции на частоте зондирующего излучения 67 ГГц

На рис. 3 показана зависимость квадрата частоты ω_0^2 от B_0^2 . Наблюдается линейная зависимость, что соответствует расчетной зависимости (6). Экстраполяция этой зависимости на значение $B_0 = 0$ 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, равное $7 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

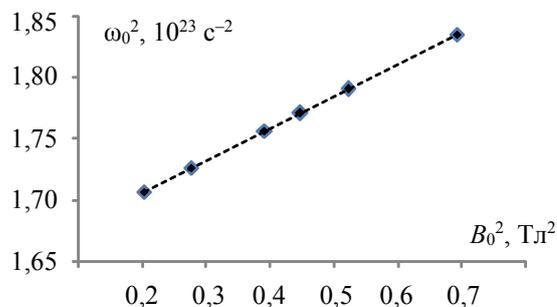


Рис. 3. Зависимость квадрата частоты ω_0 , соответствующей минимальному пропусканию зондирующего излучения, от квадрата магнитной индукции

Оценка концентрации носителей заряда 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 S , рассчитанное по формуле (1) при $I_s = 40 \text{ Вт/м}^2$, составляет 25 м/с. При расчетах полагалось, что излучение

фотовозбуждающего лазерного диода в плоскости образца образует конус с площадью основания около 1 см^2 .

Предлагаемая методика не требует использования данных о коэффициенте диффузии и времени жизни носителей в объеме полупроводника и может быть полезной для определения скорости поверхностной рекомбинации с использованием излучений миллиметрового диапазона.

Список литературы

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. P. 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. Зеегер К. *Физика полупроводников*. М.: Мир, 1977. 615 с.
5. Басс Ф. Г., Гуревич Ю. Г. Горячие электроны и сильные электромагнитные волны в плазме полупроводников и газового разряда. М.: Наука, 1975. 400 с.

References

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. Chen F. X., Qui R. Q., Xu L., Meng F. U., Zao Z. X., Zhou Z. B. Separation of the bulk lifetime and surface recombination velocities in semiconductor wafer by a single microwave photoconductance. *Semicond. Sci. and Technology*, 2004, vol. 19, no. 9, pp. 959–963.
3. Bogatyrenko V. V., Zinovchuk A. V. Measurements of surface recombination velocity and volumetric lifetime in Si wafers by kinetics of excess thermal radiation. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Semiconductor physics and engineering], 2015, vol. 45, issue 1, pp. 62–66 (In Russian).
4. Zeeger K. *Fizika poluprovodnikov* [Physics of semiconductors]. Moscow, Mir Publ., 1977. 615 p.
5. Bass F. G., Gurevich Yu. G. *Goryachiye elektrony i sil'nyye elektromagnitnyye volny v plazme poluprovodnikov i gazovogo razryada* [Hot electrons and strong electromagnetic waves in plasma of semiconductors and gas discharge]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 400 p.

Информация об авторе

Мадьяров Владимир Рафкатович – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: madyarov@belstu.by

Information about the author

Mad'yarov Vladimir Rafkatovich – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Physics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: madyarov@belstu.by

Поступила после доработки 07.04.2020