

МЕТОДЫ И ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 539.293, 621.315.592

Локальное измерение электрооптических параметров кремниевых структур на основе фоторефрактивного эффекта

А.Л.Филатов, А.В.Герус, Е.М.Кораблев, А.В.Луговской

**Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
(Фрязинское отделение)**

На основе анализа исследований фоторефрактивного эффекта предложены новые методики локальных измерений коэффициента поглощения света на длине волны излучения накачки и коэффициента влияния концентрации неравновесных носителей заряда на коэффициент преломления света на длине волны зондирующего излучения. Теоретически и экспериментально исследованы особенности применения предложенных методик.

Фотоакустические методы разрабатывались для определения света в конденсированных слабо поглощающих средах [1]. В первых экспериментах использовалась газомикрофонная ячейка. Образец помещался в замкнутый, заполненный газом объем (газомикрофонную ячейку) и облучался промоделированным по интенсивности излучением. Поглощенная в образце энергия излучения приводила к смещению поверхности образца и нагреванию приповерхностного слоя газа. Это вызывало возникновение избыточного давления газа в ячейке, которое регистрировалось встроенным в ячейку микрофоном. Преимущества этих методов – высокая точность и возможность проводить бесконтактные, неразрушающие образцы измерения. Позже появились модификации фотоакустических методов [2, 3], позволяющие определять другие параметры конденсированных сред и использующие разные методы регистрации акустических волн, которые возникают в результате поглощения промодулированного по интенсивности света.

В работах [4, 5] предложен и развит новый фотоакустический метод, названный фоторефрактивным. Метод позволяет измерять время жизни и коэффициент диффузии неравновесных носителей заряда в полупроводниках. Дальнейшее исследование показало возможность применения этого метода для определения и других параметров полупроводников в результате локального, одновременного измерения в ходе одного эксперимента [7].

В настоящей работе рассматриваются проблемы применения фоторефрактивного метода для одновременного определения еще двух параметров кремниевых структур: коэффициента поглощения света на длине волны излучения накачки и зависимости коэффициента преломления среды от концентрации неравновесных носителей на длине волны зондирующего излучения.

© А.Л.Филатов, А.В.Герус, Е.М.Кораблев, А.В.Луговской, 2008

Математическая модель фоторефрактивного эффекта предложена и экспериментально проверена в работе [4]. Из модели следует, что для проекции угла отклонения Θ , перпендикулярной лучу накачки, имеем следующее выражение:

$$\Theta_x(x, z) = \text{const} \exp(-\beta z) \left\{ \left[\alpha + \frac{\Omega_0}{\Omega_0 + i\Omega(1 - \Omega_0)} \right] \exp(-\mu_0 X) - \left[Q + \frac{\Omega_0}{\Omega_0 + i\Omega(1 - \Omega_0)} \right] \exp(-\eta_0 X) \right\}. \quad (1)$$

Здесь $\alpha = -\frac{\chi}{E_g D} \left(\frac{\partial n^{opt}}{\partial n} \right) \left(\frac{\partial n^{opt}}{\partial T} \right)^{-1}$; $\Omega_0 = \frac{\kappa}{D}$; $\Omega = \omega\tau$; $Q = \frac{h\nu - E_g}{\gamma E_g}$; $X = x/L_q$; $\mu_0 = \sqrt{1 - i\Omega}$; $\eta_0 = \sqrt{-i\Omega/\Omega_0}$; x – расстояние между зондирующим лучом и лучом накачки;

n – концентрация фотовозбужденных носителей заряда; n^{opt} – коэффициент преломления зондирующего излучения; T – температура образца; χ – коэффициент теплопроводности; E_g – ширина запрещенной зоны; γ – квантовый выход; $h\nu$ – энергия квантов излучения накачки; L_q – характерная длина диффузии носителей заряда.

Выражение (1) справедливо только при выполнении следующих условий: 1) радиус луча накачки r намного меньше, чем характерные длины диффузии носителей заряда $L_q = (D\tau)^{1/2}$ и тепла $L_{th} = \sqrt{2\kappa/\omega}$, где D – коэффициент амбиполярной диффузии, τ – время жизни носителей, κ – коэффициент температуропроводности, ω – частота модуляции интенсивности излучения; 2) исследуемая область находится на расстоянии z , большем, чем характерные длины L_q и L_{th} ; 3) обратный коэффициент поглощения излучения накачки $1/\beta$ превосходит все другие характерные длины.

Экспериментальная установка полностью соответствует описанной в статье [6]. На рис.1 показан ход лазерных лучей в образце. В качестве источника луча накачки использовался YAG-лазер с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм. Зондирующий луч генерировался HeNe-лазером с длиной волны $\lambda = 1,15$ мкм. Снимались зависимости амплитуды и фазы фоторефрактивного сигнала, пропорционального углу отклонения Θ_x , от расстояния между лучами x при постоянной частоте.

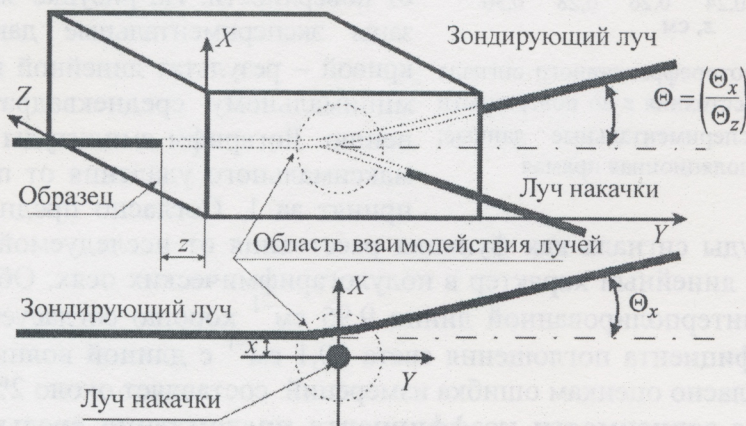


Рис.1. Схема прохождения лучей в фоторефрактивных экспериментах

Измерения коэффициента поглощения света. Из формулы (1) видно, что при фиксированном расстоянии между лучами и частоте модуляции интенсивности излучения накачки амплитуда фоторефрактивного сигнала вдали от поверхности изменяется как $\exp(-z\beta)$. Таким образом, проводя измерения на различных расстояниях от поверхности, имеем возможность определить коэффициент поглощения света на длине волны излучения накачки. При этом следует учесть, что так как удаление от поверхности эквивалентно эффективному уменьшению мощности излучения накачки и представленная формула была рассчитана для линейного по мощности фоторефрактивного эффекта, то предложенная методика измерений справедлива только в случае линейности сигнала от мощности. Такая линейность наблюдается не всегда. Механизмы, приводящие к нелинейности фотоакустического эффекта, были проанализированы в статье [7]. Главными из них являются изменения времени жизни носителей в зависимости от соотношения концентрации равновесных и неравновесных носителей и изменения коэффициента амбиполярной диффузии в зоне примерного равенства концентрации равновесных и неравновесных носителей. Тем не менее, практически в любом образце имеется возможность выбрать интервал изменения интенсивности в e раз, в котором фоторефрактивный эффект будет линейным. В данной работе ограничимся рассмотрением методики измерения коэффициента поглощения света в линейной области. Критерием нахождения в такой области является сохранение формы амплитуды и фазы фоторефрактивного сигнала при удалении от поверхности. За пределами линейной области также можно проводить измерения коэффициента поглощения, например с использованием критериев квазилинейного фоторефрактивного эффекта [7].

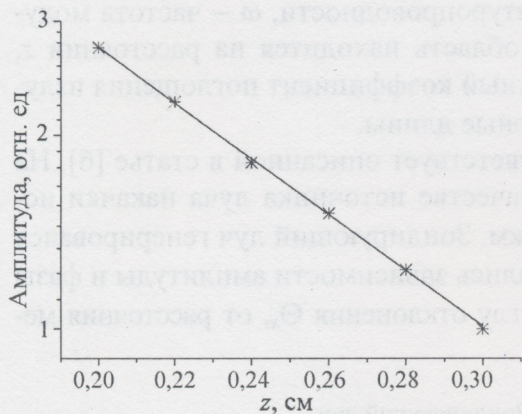


Рис.2. Амплитуда фоторефрактивного сигнала в зависимости от расстояния z до поверхности образца: * — экспериментальные данные; — интерполяционная прямая

В качестве иллюстрации предложенной методики на рис.2 представлена зависимость натурального логарифма амплитуды фоторефрактивного сигнала в относительных единицах от расстояния до поверхности образца. Измерения проводились при частоте модуляции излучения накачки 1850 Гц, расстоянии между лучами 0,06 см, мощности излучения накачки 0,9 Вт, на образце кремния с удельным сопротивлением 20 кОм·см, на расстояниях 0,2; 0,22; 0,24; 0,26; 0,28; 0,3 см от поверхности. На рисунке звездочками показаны экспериментальные данные, сплошной кривой — результат линейной интерполяции по минимальному среднеквадратичному отклонению. Логарифм амплитуды сигнала в точке максимального удаления от поверхности был принят за 1. Согласно предположению зави-

симость амплитуды сигнала как функция расстояния от исследуемой области до поверхности имеет линейный характер в полулогарифмических осях. Обратный коэффициент наклона интерполированной линии $9,95 \text{ см}^{-1}$ хорошо согласуется с известным значением коэффициента поглощения света $10,1 \text{ см}^{-1}$ с длиной волны $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$ в кремнии [8]. Согласно оценкам ошибка измерений составляет около 2%.

Определение зависимости коэффициента преломления среды от концентрации неравновесных носителей. Из формулы (1) видно, что в зависимости коэффициента преломления зондирующего излучения от концентрации неравновесных носителей dn^{opt}/dn входит безразмерный коэффициент α вместе с коэффициентами, которые могут быть либо измерены в ходе эксперимента (D определяется по методике, изложенной

в [6]), либо являются табличными данными (при $T = 300$ К $E_g = 1,12$ эВ [9], $\partial n^{opt}/\partial T = 2,5 \cdot 10^{-4}$ К $^{-1}$ [10]). Коэффициент теплопроводности χ может быть взят из таблицы [10] или вычислен исходя из экспериментального [6] измерения коэффициента температуропроводности κ по формуле $\chi = \kappa C_p$ с учетом табличных данных [10] $\rho = 2,33$ г/м 3 , $C_p = 618,4$ Дж/(кг·К).

Таким образом, основной проблемой определения коэффициента $\partial n^{opt}/\partial n$ на базе фоторефрактивного эффекта является необходимость предварительного определения коэффициента амбиполярной диффузии при неизвестном коэффициенте α . Проведенный численный анализ и математическое моделирование формулы (1) показали, что на высоких частотах, когда характерная длина «электронной» компоненты сигнала $L_{eff} = \sqrt{2D\tau/(1 + \sqrt{1 + \Omega^2})}$ становится намного больше характерной длины его «тепловой» компоненты $L_{th} = \sqrt{2\kappa/\omega}$, коэффициент α слабо влияет на форму сигнала. На частотах модуляции интенсивности излучения накачки, когда эти характерные длины приблизительно равны, фаза фоторефрактивного сигнала начинает сильно зависеть от величины коэффициента α .

Экспериментальная проверка возможности определения коэффициента $\partial n^{opt}/\partial n$ фоторефрактивным методом выполнена на образцах кремния с удельным сопротивлением 20 кОм·см при мощности излучения накачки 0,9 Вт. На рис.3 приведены экспериментальные и теоретические зависимости фоторефрактивного сигнала от расстояния между лучами, полученные при двух частотах модуляции излучения накачки 10 и 1890 Гц. Расчет зависимостей для каждой из частот проводился для трех значений коэффициента $\alpha = 2,3; 3,3; 4,3$. Из графиков видно, что при частоте 1890 Гц, когда преобладает «электронная» компонента, расчетные кривые амплитуды и фазы фоторефрактивного сигнала совпадают для всех значений коэффициента α . Поэтому независимо от величины α из наклона фазовых и амплитудных графиков по методике, описанной в работе [6], имеется возможность определить коэффициент амбиполярной диффузии. В рассматриваемом эксперименте измеренная $D = 18$ см 2 /с. На частоте 10 Гц, когда наблюдается конкуренция «электронного» и «теплого» вкладов в сигнал, кривые, рассчитанные для различных значений коэффициента α , особенно сильно различаются в фазовых зависимостях. Поэтому для определения величины α необходимо сопоставлять экспериментальные и расчетные результаты именно на фазовых зависимостях. В рассматриваемом эксперименте $\alpha = 3,3$.

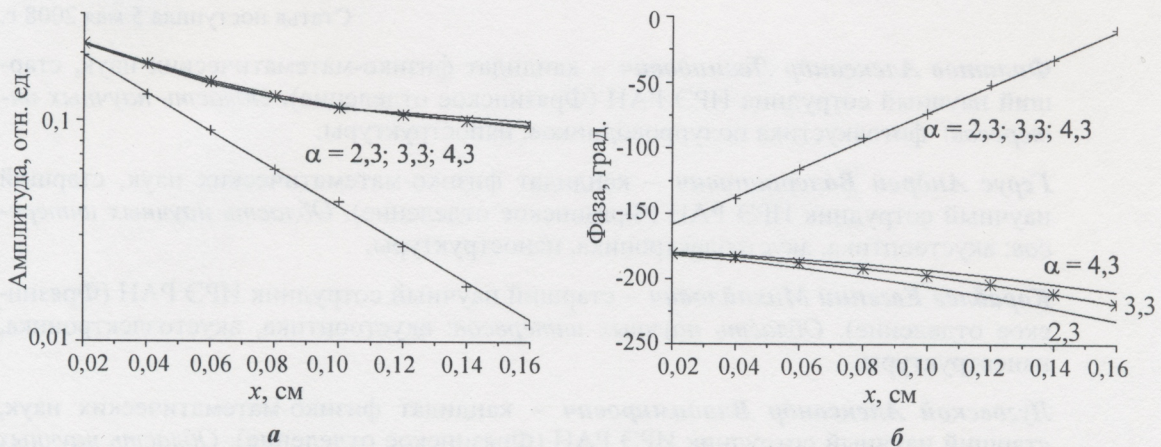


Рис.3. Зависимость амплитуды (а) и фазы (б) фоторефрактивного сигнала от расстояния между лучами: *, + – экспериментальные значения для частот 10 и 1890 Гц соответственно; — результаты расчета при трех значениях безразмерного параметра

Экспериментальная проверка предложенных методик определения коэффициента поглощения света на длине волны излучения накачки и величины зависимости коэффициента преломления среды от концентрации неравновесных носителей на длине волны зондирующего излучения показала хорошее количественное совпадение теоретических и экспериментальных результатов.

Главное преимущество новых фоторефрактивных методик состоит в локальности, бесконтактности и возможности определения искомым параметров в любой точке объема кремниевых структур. Информация о распределении измеряемых величин в образце важна по трем причинам. Во-первых, она повышает достоверность и уменьшает ошибку в определении времени жизни носителей заряда фоторефрактивным методом, так как при вычислении этого параметра можно использовать измеренные, а не табличные данные. Во-вторых, полученные данные дают прямую информацию, необходимую в качестве базовой в родственных фотоакустических методах [2]. В-третьих, измеренные величины характеризуют распределение других, связанных с ними параметров кремниевых структур, например уровня и вида легирования.

Литература

1. *Rosencwaig A.* Photoacoustics and photoacoustic spectroscopy. – N.Y.: Wiley, 1980. – 299 p.
2. *Fournier D., Voccaro A.C., Skumanich A., Amer N.M.* Photothermal investigation of transport in semiconductors: theory and experiment // J. Appl. Phys. – 1986 – Vol. 59, N 3. – P. 787–795.
3. *Миргородский В.И., Орлова Г.А., Филатов А.Л.* Дистанционное зондирование температуропроводности твердых тел фототермодеформационным методом // ЖТФ. – 1992. – Т. 3. – Вып. 63. – С. 180–185.
4. *Filatov A.L., Sablicov V.A., Mirgorodsky V.I.* Photorefractive method of contactless determination of the charge carrier lifetime and diffusion coefficient in semiconductors // Semicond. Sci. Technol. – 1993. – Vol. 8. – P.694–699.
5. *Филатов А.Л., Миргородский В.И., Сабликов В.А.* Фоторефрактивный метод бесконтактного зондирования рекомбинационных параметров полупроводников // ФТП. – 1993. – Т. 27. – Вып. 1. – С. 81–85.
6. *Филатов А.Л.* Квазилинейный фоторефрактивный эффект в кремнии // Физика и техника полупроводников. – 2000. – Т. 34. – Вып. 11. – С. 1322–1326.
7. *Филатов А.Л., Луговской А.В.* Особенности применения фоторефрактивного эффекта для комплексного трехмерного локального измерения электрофизических параметров кремниевых структур // Изв. вузов. Электроника. – 2008. – № 1. – С. 74–78.
8. *Jellison G.E., Jr. and Burke H.H.* The Temperature dependence of the refractive index of silicon at elevated temperatures at several laser wavelengths // J. of Appl. Phys. – Vol. 60, N 2. – P. 841–843.
9. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов: В 2 кн. Кн.1: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
10. Физические величины: Справочник / Под ред. *И.С.Григорьева, Е.З.Мейлихова.* – М.: Энергоиздат, 1991. – 1232 с.

Статья поступила 5 мая 2008 г.

Филатов Александр Леонидович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИРЭ РАН (Фрязинское отделение). *Область научных интересов:* фотоакустика полупроводников, наноструктуры.

Герус Андрей Валерианович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИРЭ РАН (Фрязинское отделение). *Область научных интересов:* акустооптика, акустоэлектроника, наноструктуры.

Кораблев Евгений Михайлович – старший научный сотрудник ИРЭ РАН (Фрязинское отделение). *Область научных интересов:* акустооптика, акустоэлектроника, наноструктуры.

Луговской Александр Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИРЭ РАН (Фрязинское отделение). *Область научных интересов:* фотоакустика, спиновые волны в магнетиках, дистанционное СВЧ-зондирование земной поверхности.