

06

© 1991 г.

## КОНТРОЛЬ ОБЪЕМНОГО ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ И СКОРОСТИ ПОВЕРХНОСТНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ МЕТОДОМ ИНФРАКРАСНОГО ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

*В. Б. Воронков, А. С. Иванов, К. Ф. Комаровских,  
Д. Г. Летенко, А. Б. Федорцов, Ю. В. Чуркин*

Предложен бесконтактный оптический метод измерения объемного времени жизни неравновесных носителей заряда и скорости их поверхностной рекомбинации, основанный на оптической генерации неравновесных носителей заряда в полупроводниках и бесконтактном оптическом интерференционном съеме информации. Исследованы серии образцов из кремния различной толщины с различным состоянием поверхности. При существенном различии эффективных времен жизни исследуемых образцов объемное время жизни лежит в диапазоне 320—350 нс. Эти величины, а также значения скоростей поверхностной рекомбинации для различного состояния поверхности хорошо согласуются с данными, полученными для исследуемых образцов другими методами.

Известно, что поверхностная рекомбинация приводит к тому, что при измерениях времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниках определяют не истинное объемное его значение  $\tau$ , а некоторое эффективное время жизни  $\tau'$ . Чем выше скорость поверхностной рекомбинации, тем сильнее отличается величина эффективного времени жизни от его объемного значения. Однако работа многих полупроводниковых приборов определяется значением именно объемного времени жизни. Поэтому при межоперационном контроле производства ряда полупроводниковых приборов, например тиристоров, важно контролировать именно объемное время жизни. При изготовлении и исследовании свойств полупроводниковых материалов также желательно определять объемное значение времени жизни как объективную характеристику материала, а не значение  $\tau'$  в конкретном образце.

Авторы предлагают бесконтактный оптический метод измерения как объемного времени жизни неравновесных носителей заряда, так и скорости их поверхностной рекомбинации. Предложенный метод основан на оптической генерации неравновесных носителей заряда в полупроводнике и бесконтактном оптическом интерференционном съеме информации о времени их жизни, описанным в [1-3].

Интерференционный съем информации осуществляется следующим образом. Образец материала выполняется в виде плоскопараллельной пластинки. Через него пропускается зондирующий луч инфракрасного лазера с длиной волны  $\lambda_z$ , соответствующей области прозрачности материала. Фотоприемником измеряется интенсивность зондирующего луча после его взаимодействия с полупроводником. Вследствие интерференции она зависит от величин показателей преломления  $n$  и поглощения  $k$  материала. Неравновесные носители заряда дают вклад в величины  $n$  и  $k$ . Поэтому при прерывистом освещении образца излучением из области фотоактивного поглощения возникает модуляция зондирующего луча инфракрасного лазера. Из ее измеренного значения  $M$  можно определить эффективное время жизни носителей заряда в образце  $\tau'$ , как это показано в [2].

При оптической генерации неравновесных носителей заряда измеряемое на опыте их эффективное время жизни зависит не только от скорости поверхностной рекомбинации, но и от глубины проникновения света оптического инжектора, генерирующего носители, иначе говоря, от коэффициента поглощения этого света в полупроводнике.

В работе [4] показано, что в условиях равномерного освещения полупроводника эффективное время жизни неравновесных носителей заряда  $\tau'$  связано с объемным значением  $\tau$  следующим соотношением:

$$\tau' = \frac{\tau}{1 + R \operatorname{cth} \frac{W}{Z}} \left[ 1 + \frac{RW \left[ W \operatorname{cth} \left( \frac{W}{2} \right) - Z \operatorname{cth} \left( \frac{Z}{2} \right) \right]}{W^2 - Z^2} \right], \quad (1)$$

где  $R = S\sqrt{\tau/D}$ ,  $W = l/\sqrt{D\tau}$ ,  $Z = \alpha l$ ;  $S$  — скорость поверхностной рекомбинации;  $D$  — коэффициент диффузии;  $l$  — толщина полупроводникового образца;  $\alpha$  — коэффициент поглощения света, генерирующего неравновесные носители.

Предлагаемый метод определения объемного значения  $\tau$  и скорости поверхностной рекомбинации  $S$  основан на интерференционном измерении эффективного времени жизни носителей заряда в исследуемом образце при использовании в качестве оптического инжектора последовательно нескольких монохроматических источников, имеющих разную длину волны. Длина волны этих источников выбирается так, чтобы глубина проникновения излучения разных инжекторов была различной и тем самым обеспечивалась различная в сравнении с длиной диффузии носителей заряда глубина, на которой производится генерация электронно-дырочных пар излучением оптического инжектора. Например, если провести измерения при двух различных длинах волн оптического инжектора  $\eta_1$  и  $\eta_2$  и соответствующих им коэффициентах поглощения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , то мы получим вместо уравнения (1) систему двух уравнений с двумя неизвестными  $\tau$  и  $S$ . Решая эту систему, можно в принципе вычислить как объемное время жизни, так и скорость поверхностной рекомбинации. Для решения этой системы надо, естественно, знать из литературы или дополнительных опытов значения коэффициента диффузии  $D$  и коэффициентов поглощения излучения инжектора  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  на используемых длинах волн  $\eta_1$  и  $\eta_2$ .

Надо отметить, что решение подобной системы уравнений в общем случае весьма затруднительно. Однако в некоторых случаях эта система упрощается. Например, в случае толстых образцов (с толщиной  $l$ , много большей диффузионной длины носителей заряда, равной  $\sqrt{D\tau}$ ) измеренные значения эффективного времени жизни  $\tau$  на длинах волн инжектора, близких к красной границе внутреннего фотоэффекта в данном полупроводнике ( $\lambda_1 \ll \eta_{кп}$ ), будут близки к объемному значению  $\tau$ , так как на этих длинах волн поглощение мало и генерация пар происходит практически равномерно по объему образца. С другой стороны, при проведении измерений на коротких ( $\lambda \ll \eta_{кп}$ ) волнах, сильно поглощающихся полупроводником, можно определить скорость поверхностной рекомбинации [5].

Однако в реальных случаях далеко не всегда возможно обеспечить подбор достаточно интенсивных источников с требуемыми длинами волн  $\eta_1$  и  $\eta_2$  и изготовить для измерений образец необходимой толщины. Часто встречается ситуация, когда толщина образца соизмерима с длиной диффузии в нем носителей заряда. При этом на процессы генерации — рекомбинации носителей заряда в объеме полупроводников оказывают влияние обе поверхности полупроводникового образца — передняя и задняя. В этом случае, даже если длина волны оптического инжектора близка к  $\eta_{кп}$  и происходит объемная генерация носителей заряда, измеренное эффективное значение их времени жизни будет существенно отличаться от его объемного значения. Избежать сложностей при решении системы уравнений (1) в данном случае можно соответствующим выбором длин волн оптического инжектора. Наилучший результат в этом случае дает следующий вариант: одна из длин волн инжектора выбирается вблизи красной границы фотоэффекта (случай слабого поглощения и объемной генерации носи-

телей тока), другая — в области сильного поглощения и поверхностной генерации, т. е.  $\alpha^{-1} \ll \sqrt{D\tau}$ .

В данной работе предложенный метод применялся для исследования кремневых образцов. Выбор этого материала объясняется несколькими причинами. Во-первых, кремний — это хорошо изученный материал, у которого хорошо известны оптические и электрофизические характеристики и механизмы рекомбинации носителей заряда, что упрощает интерпретацию полученных результатов. Во-вторых, ширина запрещенной зоны кремния такова, что для создания в нем условий объемной и поверхностной генерации носителей имеется достаточный выбор оптических инжекторов (гелий-неоновый и криптоновый лазеры, полупроводниковые лазеры и светодиоды на основе GaAs или тройных соединений GaAlAs). В-третьих, именно кремний наиболее широко используется в полупроводниковой электронике.

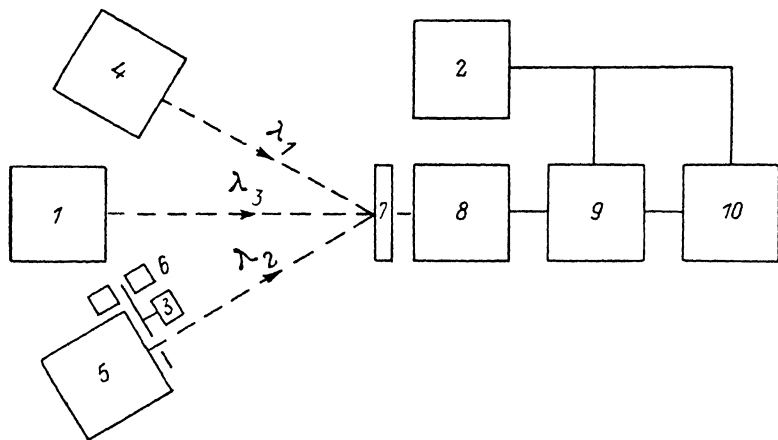


Рис. 1. Экспериментальная установка.

1 — источник зондирующего излучения ЛГ-74 ( $\lambda=10.6$  мкм); 2 — осциллограф С1-70; 3 — механический obturator; 4 — инжектор на основе светодиодов АЛ-119А ( $\lambda=0.94$  мкм); 5 — инжектор ЛГ-126 ( $\lambda=0.63$  мкм); 6 — оптронная пара; 7 — образец; 8 — фотоприемник; 9 — селективный усилитель У2-8; 10 — синхронный детектор В9-2.

Для проведения опытов из слитка кремния с  $\rho=130 \pm 10$  Ом·см была вырезана серия образцов различной толщины ( $l=1, 2, 3$  и  $4$  мм). Диффузионная длина носителей  $d$  в слитке была примерно  $0.8$  мм. Для кремния был произведен следующий выбор длин волн оптического инжектора:  $\lambda_1=0.63$  мкм ( $\alpha_1=2.5 \times 10^3$  см $^{-1}$ ) и  $\lambda_2=0.94$  мкм ( $\alpha_2=100$  см $^{-1}$ ). В этом случае  $1/\alpha_1 \ll l$  и  $1/\alpha_2 \approx l \approx d$  и система уравнений приводится к следующему виду:

$$\tau'_{0.94} = \tau - \frac{\tau - \tau'_{0.63}}{\frac{l}{2\sqrt{D\tau}} \operatorname{cth}\left(\frac{l}{2\sqrt{D\tau}}\right) - \frac{l}{2D\alpha_{0.63}}}, \quad (2)$$

$$S = \frac{\tau - \tau'_{0.63}}{\tau_{0.63} \sqrt{\frac{\tau}{D}} \operatorname{cth}\left(\frac{l}{2\sqrt{D\tau}}\right) - \frac{\tau}{\alpha_{0.63} D}}. \quad (3)$$

Измерив по описанной в [2] методике эффективные времена жизни  $\tau'_{0.63}$  (при длине волны оптического инжектора  $\eta_1=0.63$  мкм) и  $\tau'_{0.94}$  ( $\eta_2=0.94$  мкм), можно из уравнения (2) рассчитать объемное время жизни  $\tau$ . Подставляя полученное значение  $\tau$  в уравнение (3), мы получим скорость поверхностной рекомбинации  $S$ . Для проведения опытов из отрезанных образцов изготавливались плоскопараллельные пластинки. Это необходимо для применения упомянутого уже бесконтактного оптического интерферционного метода измерения эффективного времени жизни. Отметим, что использование в этом методе оптического зонда с длиной волны  $10.6$  мкм делает требования к плоскопараллельности исследуемых образцов не очень строгими. Перепад образцов по толщине в пре-

l, мм	Шлифовка				Полировка				Травление			
	$\tau'_{0.63}$	$\tau'_{0.94}$	$\tau$	S	$\tau'_{0.63}$	$\tau'_{0.94}$	$\tau$	S	$\tau'_{0.63}$	$\tau'_{0.94}$	$\tau$	S
1	1.5	85	350	$1 \cdot 10^5$	35	70	330	1100	75	105	340	470
2	2	110	340	$1.2 \cdot 10^5$	40	140	350	1010	80	160	350	640
3	2	160	320	$1 \cdot 10^5$	50	190	340	1300	83	210	340	680
4	2	215	330	$0.6 \cdot 10^5$	60	230	350	1150	85	240	350	700

делах луча оптического зонда не должен превышать 1 мкм, этим требованиям удовлетворяют практически все полупроводниковые пластины, изготовленные по технологии, принятой в микроэлектронике. Более того, подобный выбор оптического зонда позволяет проводить исследования даже на шлифованных абразивным порошком с не очень крупным зерном (M10, M7 и т. п.) образцах [6, 7]. Поверхности исследуемых образцов последовательно подвергались шлифовке, полировке и травлению в полирующем травителе с целью получения различной скорости поверхностной рекомбинации. После каждой операции поверхностной обработки измерялись эффективные времена  $\tau'_{0.63}$  и  $\tau'_{0.94}$  и вычислялись объемное время жизни  $\tau$  и скорость поверхностной рекомбинации S, соответствующая данной обработке поверхности.

Блок-схема экспериментальной установки показана на рис. 1. В качестве инжектора в данной установке использовались гелий-неоновый лазер ЛГ-126

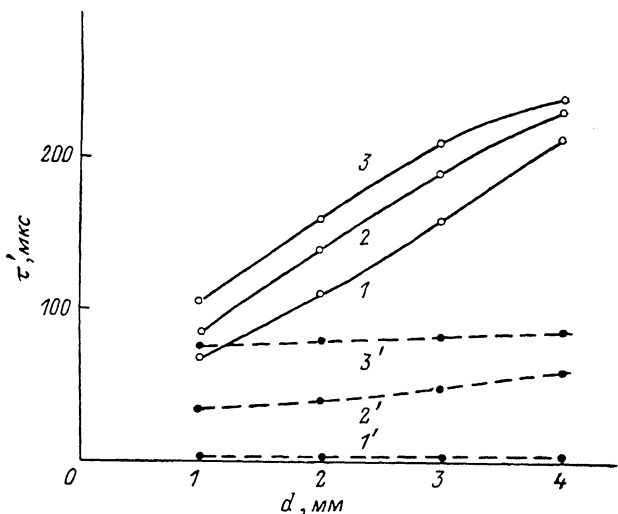


Рис. 2. Зависимости эффективных времен жизни  $\tau'_{0.63}$  и  $\tau'_{0.94}$  от толщины образца  $d$  для различных состояний поверхности.

1, 1' — шлифованная поверхность; 2, 2' — полированная поверхность; 3, 3' — поверхность, обработанная травлением;  $\lambda_n$ , мкм: 1—3 — 0.94, 1'—3' — 0.63.

( $\eta_1=0.63$  мкм,  $\alpha_{0.63}=2.5 \cdot 10^3$  см<sup>-1</sup>) и светодиода АЛ-119А ( $\eta_2=0.94$  мкм,  $\alpha_{0.94}=100$  см<sup>-1</sup>). В качестве источника длинноволнового зондирующего излучения использовался СО<sub>2</sub> лазер ЛГ-74 ( $\eta_3=10.6$  мкм). Излучение оптического зонда, прошедшее исследуемый полупроводниковый образец, регистрировалось пироэлектрическим фотоприемником МГ-30. Для повышения чувствительности применялись селективное усиление и синхронное детектирование.

Значения измеренных эффективных времен жизни  $\tau'_{0.63}$  и  $\tau'_{0.94}$ , а также рассчитанного объемного времени жизни  $\tau$  и скорости поверхностной рекомбинации S приведены в таблице и на рис. 2.

Для всех исследованных образцов, несмотря на существенное различие эффективных времен жизни  $\tau'_{0.94}$  и  $\tau'_{0.63}$  (ввиду различного состояния поверхности образцов после каждого этапа ее обработки и различной толщины образцов), объемное время жизни неравновесных носителей заряда  $\tau$ , рассчитанное по результатам опытов, лежит в диапазоне значений от 320 до 350 мкс. Эти величины, а также значения S для различного состояния поверхностей хорошо согласуются с данными, полученными методом модуляции проводимости в точечном контакте в той же лаборатории ФТИ им. А. Ф. Иоффе, где изготавливались исследованные авторами полупроводниковые образцы.

Полученные результаты указывают на значительную универсальность предложенного метода, определения величин  $\tau$  и S. Метод является неразру-

шающим, бесконтактным и локальным (локальность определяется размерами пучков лучей инжектора и зонда). Для определения объемного времени жизни неравновесных носителей тока не требуется подготовка поверхности образца каким-либо специальным образом, что дает возможность использовать данный метод для контроля этого параметра не только в лабораторной практике, но и при промышленном производстве полупроводниковых приборов.

#### Список литературы

- [1] *Выжигин Ю. В., Комаровских К. Ф., Федорцов А. Б., Чуркин Ю. В.* // ФТП. 1986. Т. 20. Вып. 9. С. 1747—1749.
- [2] *Федорцов А. Б., Чуркин Ю. В.* // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 4. С. 321—324.
- [3] *Курбатов Л. И., Овчинников И. М., Сороко-Новицкий Н. В.* // УФЖ. 1985. Т. 30. № 6. С. 920—924.
- [4] *Бьюб Р.* Фотопроводимость твердых тел. М.: ИЛ, 1962. 558 с.
- [5] *Спен F. J.* // Appl. Phys. Lett. 1985. Vol. 47. N 8. P. 858—859.
- [6] *Федорцов А. Б., Чуркин Ю. В.* // Деп. в ВИНТИ. № 1456—В87. М., 1987.
- [7] *Федорцов А. Б., Чуркин Ю. В., Шалыгин В. А., Штурбин А. В.* // Деп. в ВИНТИ. № 1457—В87. М., 1987.

Северо-западный заочный  
политехнический институт  
Ленинград

Поступило в Редакцию  
10 января 1990 г.

