

07

Абсолютный эталон диффузионной длины и времени жизни неосновных носителей заряда в монокристаллическом кремнии

© В.А. Скиданов

Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, Москва
E-mail: skidanov@ippm.ru

Поступило в Редакцию 28 мая 2014 г.

Существенное различие в сечениях рекомбинации электронов на комплексах Fe–В σ_1 и на активированных ионах железа σ_2 в монокристаллическом кремнии, легированном бором, использовано для независимого определения времени жизни электронов в эталоне T_{st} с помощью метода поверхностной фотоэдс. Пары значений времени жизни электронов T_1 и T_2 до и после разложения комплексов Fe–В были измерены для каждого из 600 слитков при произвольно выбранном значении диффузионной длины L_{cal} для калибрующего образца и размещены на плоскости (T_1, T_2) . На границе заполненной точками области представлены слитки, загрязненные только ионами железа, так что $T_2/T_1 = \sigma_1/\sigma_2$. Истинные значения L_{st} и T_{st} калибрующего образца и отношение $\sigma_1/\sigma_2 = 12.5 \pm 0.5$ определены с помощью подбора нового значения диффузионной длины для калибрующего образца, спрямляющего границу заполненной точками области после пересчета величин T_1 и T_2 .

Концентрация и характеристики рекомбинационных центров в монокристаллическом кремнии оказывают большое влияние на функционирование как электронных, так и оптических полупроводниковых приборов. Качество полупроводникового материала характеризуют величиной времени жизни неосновных носителей заряда (ННЗ) $T = L^2/D$, где L — диффузионная длина, D — коэффициент диффузии ННЗ. Измерения проводят с помощью бесконтактного метода поверхностной фотоэдс (ПФЭ), который имеет преимущества высокой чувствительности, независимости результатов измерений от скорости поверхностной рекомбинации ННЗ и простоты подготовки образцов [1]. Определение диффузионной длины L в методе ПФЭ основано на сравнении сигналов фотоэдс $V = \text{const } IL/(\alpha^{-1} + L)$ (I — интенсивность падающего монохроматического света, α — коэффициент поглощения света), измерен-

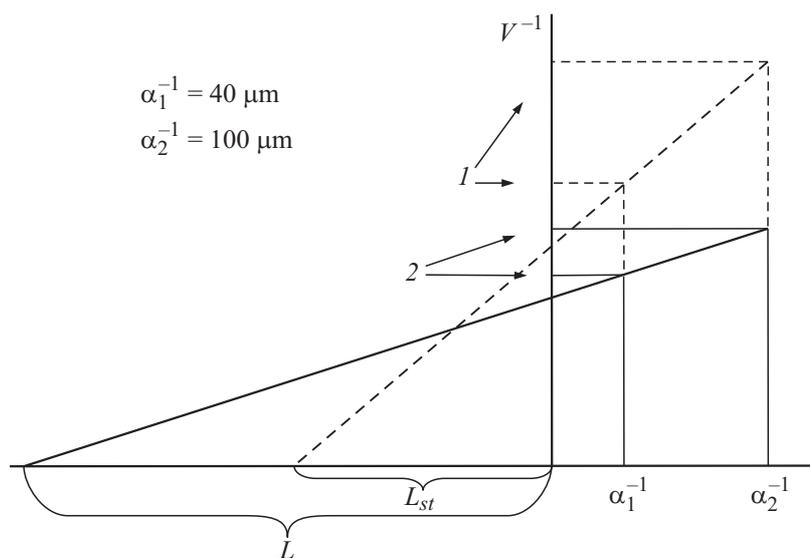


Рис. 1. Схема измерения диффузионной длины L в методе поверхностной фотоэдс: I (штриховые линии) — калибровка по эталону с величиной диффузионной длины L_{st} , 2 (сплошные линии) — измерение.

ных для исследуемого слитка и калибрующего эталонного образца с известным и стабильным значением диффузионной длины L_{st} . Сигналы фотоэдс измеряются для 2 (или более) длин волн падающего света с различными коэффициентами поглощения α_1 и α_2 в кремнии (рис. 1).

Привлекательной отличительной чертой метода ПФЭ является его способность определять наличие в слитке некоторых переходных металлов, в первую очередь железа и меди. Требования к уровню загрязнения переходными металлами непрерывно растут с уменьшением размеров элементов микросхем. Считается, что вредное влияние примесей переходных металлов вызвано главным образом осаждением (преципитацией) примеси на границе раздела между кремнием и подзатворным окислом. Полагают, что для 1 Gb ОЗУ при толщине подзатворного окисла ~ 7.5 nm граница допустимой концентрации железа находится на уровне $\sim 10^{10}$ atom/m³ [2]. Дальнейший прогресс микро- и наноэлектроники требует измерения концентрации переходных металлов на

уровне $\sim 10^9 \text{ см}^{-3}$ и менее. Ситуация осложняется тем, что примеси переходных металлов, за исключением хрома, быстро диффундируют в объеме кремния даже при относительно низких температурах во время технологических операций, так что с учетом преципитации переходных металлов критическими могут оказаться и значительно меньшие значения концентрации межузельных примесных ионов [3].

Обнаружение и измерение столь низких концентраций примеси в объеме монокристалла и ее идентификация представляют сложную задачу даже для метода ПФЭ. Поскольку разница между фотоэдс для 2 длин волн в методе ПФЭ составляет всего несколько процентов от величины фотоэдс, точные измерения концентрации примесей на уровне $\leq 10^{10} \text{ см}^{-3}$ методом ПФЭ становятся проблематичными ввиду растущего разброса значений измеряемой диффузионной длины и сильной зависимости от точности и стабильности калибрующего эталона (рис. 1). Развитые в последние годы методы обнаружения и измерения концентрации рекомбинационных центров, например по люминесценции примесных центров [4,5], также нуждаются в независимой калибровке.

Для дальнейшего развития методов исследования примесных центров в кремниевой технологии с размерами элементов в нанометровой области необходимы эталонные образцы с надежными и стабильными значениями диффузионной длины и времени жизни ННЗ, известной природой рекомбинационных центров и отсутствием эффектов залипания ННЗ на них. Кремниевые слитки, легированные бором и загрязненные исключительно ионами железа, выглядят наилучшими кандидатами на роль эталонов благодаря наличию 2 различных значений времени жизни для каждого слитка. Однако заранее нет никакой информации о типах рекомбинационных дефектов и их парциальных концентрациях для произвольно взятого слитка кремния, выращенного по методу Чохральского. Поэтому такой прямой подход не может быть реализован. Таким образом, создание надежных эталонов диффузионной длины и времени жизни ННЗ остается одной из насущных проблем в кремниевой технологии.

В данной работе представлен оригинальный подход, который позволяет любому пользователю метода ПФЭ независимо получать надежные калибрующие образцы диффузионной длины и времени жизни без какого-либо другого эталона, полученного от метрологических лабораторий.

Предлагаемый подход основан на 3 исходных положениях:

1) существенное уменьшение времени жизни электронов после интенсивного облучения видимым (белым) светом кремниевого слитка p -типа благодаря обратимому разложению пар FeV и образованию межузельных ионов железа;

2) естественное предположение, что отношение сечений рекомбинации на межузельных ионах Fe и парах FeV $\sigma_2/\sigma_1 > 1$ не зависит от их концентрации;

3) нелинейность и монотонность преобразования значений диффузионной длины L и времени жизни T при изменении величины диффузионной длины L_{cal} калибрующего образца.

Последнее положение поясняется графиком на рис. 2, на котором представлены нелинейные отклонения рассчитанных значений времени жизни, полученных методом ПФЭ при 20-процентных переоценке (кривая 1) и недооценке (кривая 2) истинного значения диффузионной длины $L_{st} = 315 \mu\text{m}$ калибрующего образца. Однако, если слиток характеризуется единственным значением времени жизни ННЗ, обнаружить отличие рассчитанного значения времени жизни от его истинного значения для произвольного образца невозможно без внешнего эталона. Иная ситуация возникает благодаря уникальной возможности разложения пар FeV после интенсивного оптического облучения слитка или отжига при температуре 250°C . В этом случае каждый слиток характеризуется 2 величинами времени жизни ННЗ: T_1 (до разложения комплексов FeV) и T_2 (после разложения комплексов FeV). Пары значений T_1 и T_2 , измеренные для набора из множества различных слитков, могут быть представлены на плоскости (T_1, T_2) в виде массива точек. Эффективные концентрации рекомбинационных центров до и после активации ионов железа могут быть выражены как $N_1 = N_{\text{Fe}} + N_{\text{oth}}$, $N_2 = \gamma N_{\text{Fe}} + N_{\text{oth}}$ соответственно, где N_{Fe} — концентрация ионов Fe (и одновременно пар FeV), N_{oth} — эффективная величина концентрации всех остальных примесей в слитке. Поскольку $T_1 \sim 1/N_1$, $T_2 \sim 1/N_2$, все точки массива (T_1, T_2) должны располагаться в секторе, заключенном между прямыми $T_2 = T_1$, представляющей слитки с $N_{\text{Fe}} \sim 0$, и $T_2 = T_1/\gamma$, представляющей слитки, загрязненные исключительно ионами железа ($N_{\text{oth}} \sim 0$). Верхняя граница $T_2 = T_1$ заполненной экспериментальными точками области остается прямой при любом произвольном значении величины L_{cal} , однако нижняя граница заполненной точками области оказывается прямой линией только для истинного значения

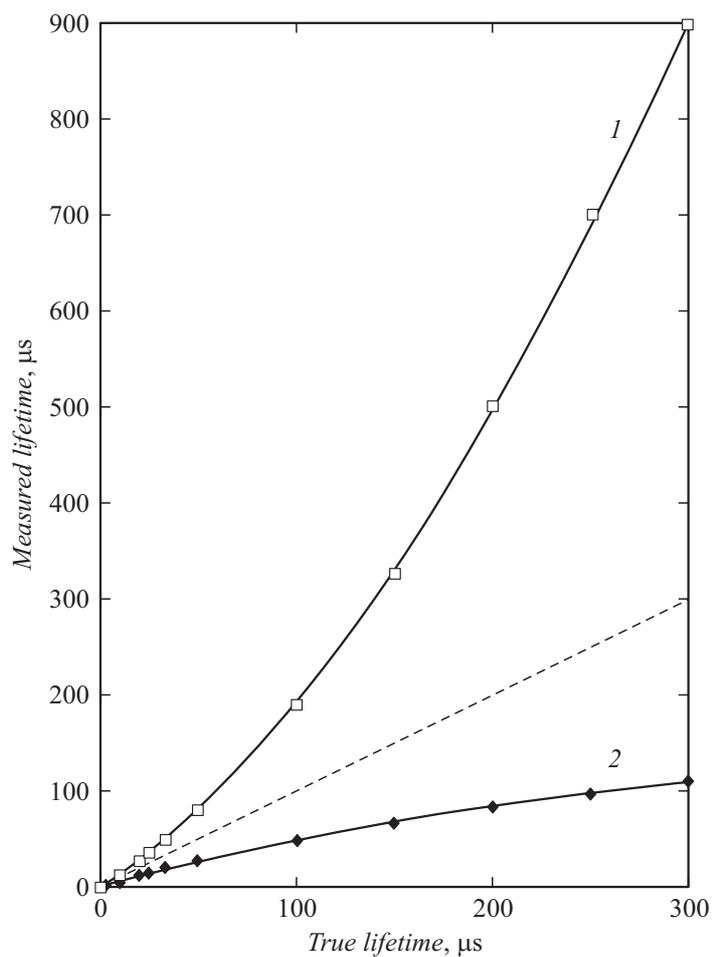


Рис. 2. Расчетные зависимости полученных значений времени жизни от истинных величин: 1 — с переоценкой диффузионной длины калибрующего образца $L_0 = L_{st} + 20\%$, 2 — с недооценкой диффузионной длины калибрующего образца $L_0 = L_{st} - 20\%$, пунктирная линия соответствует правильной калибровке $L_{st} = 315 \mu\text{m}$.

диффузионной длины $L_{cal} = L_{st}$ калибровочного образца. Для любых других значений L_{cal} нижняя граница заполненной области имеет положительную или отрицательную кривизну (рис. 2), которая может быть спрямлена соответствующим подбором калибрующего значения и пересчетом величин T_1 и T_2 для всех слитков.

Таким образом, процедура определения истинных значений времени жизни и диффузионной длины эталонного образца включает:

1) выбор слитка с однородными по площади и воспроизводимыми величинами сигналов фотоэдс и значений L с произвольно выбранной калибровкой,

2) присвоение произвольной величины диффузионной длины L_{cal} в качестве предварительной калибровки,

3) измерение значений T_1 и T_2 для широкого набора слитков кремния, легированного бором, с предварительно выбранным значением калибровки,

4) построение диаграммы точек на плоскости (T_1, T_2) ,

5) выбор нового значения величины $L_{cal} = L_{st}$, которое спрямляет нижнюю границу между заполненной точками и пустой областями после пересчета величин T_1 и T_2 .

Измерения величин T_1 и T_2 были проведены методом ПФЭ с использованием 2 длин волн с глубиной проникновения света $\alpha_1^{-1} = 40 \mu\text{m}$ и $\alpha_2^{-1} = 100 \mu\text{m}$ на более чем 600 слитках с удельным сопротивлением в диапазоне $7-15 \Omega \cdot \text{cm}$. Произвольно выбранному калибрующему образцу приписано значение $L_{cal} = 250 \mu\text{m}$. Результирующее распределение точек после проведения преобразования калибровки, спрямляющего границу точек на плоскости (T_1, T_2) , показано на рис. 3. Выбор истинного значения L_{st} был проведен посредством пошагового увеличения L_{cal} и пересчета всех величин T_1 и T_2 , пока кривизна нижней границы заполненной точки области не обратилась в нуль. Истинное значение диффузионной длины калибрующего образца оказалось равным $L_{st} = 315 \pm 7 \mu\text{m}$.

Следует заметить, что описанная процедура не требует знания параметра γ априори. Более того, алгоритм определения правильного значения времени жизни для калибровочного образца позволяет независимо установить из диаграммы на рис. 3 и параметр $\gamma = 12.5 \pm 0.5$, что близко к величине, полученной ранее [2].

После пересчета T_1 и T_2 в качестве калибрующего может быть использован любой однородный слиток из массива. Однако наиболее

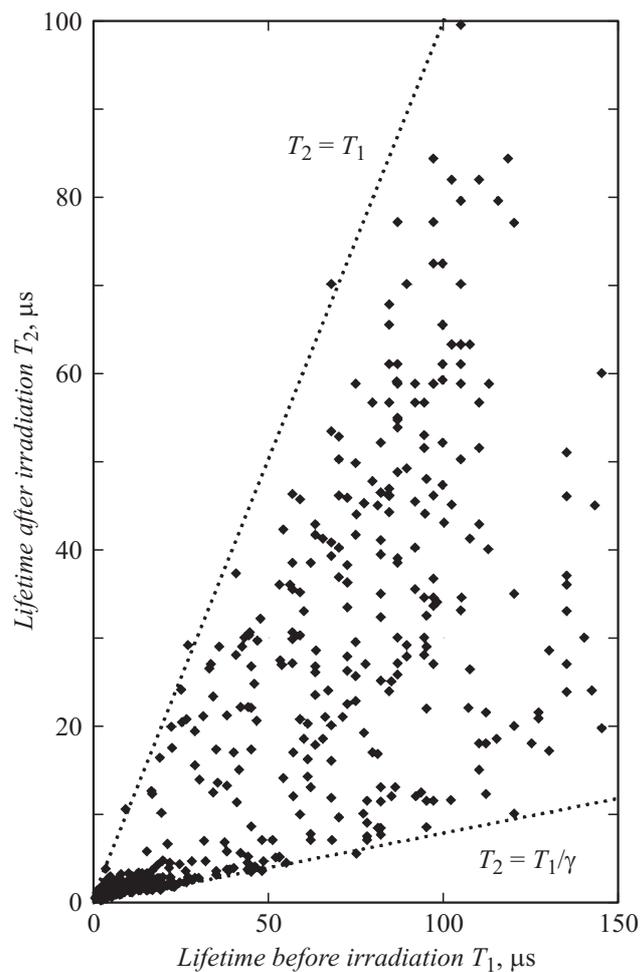


Рис. 3. Экспериментальные значения времени жизни слитков для комплексов FeV T_1 и межузельных ионов Fe T_2 после спрямления границы между заполненной точками и пустой областями на плоскости (T_1, T_2) .

надежные эталоны получены из слитков, представленных точками на границе, заполненной точками области, т.е. загрязненные только

ионами железа. Основная причина высокой стабильности этих эталонов состоит в отсутствии кислородных комплексов, которые имеют тенденцию к неконтролируемому залипанию на них части носителей заряда.

Таким образом, описанная в данной работе процедура позволяет получать эталонные образцы времени жизни ННЗ без применения исходных калибрующих средств и в этом смысле являющиеся абсолютными. Сравнение значений T , полученных описанным способом, с данными, полученными на тех же слитках разработчиками аппаратуры ПФЭ (Semiconductor Diagnostics Corp., США), показало их совпадение с точностью до 10% во всем значимом диапазоне величин времени жизни ННЗ (1–350 μ s). Отличия в данных связаны с неоднородностью распределения примеси железа по глубине в слитках и проявляются из-за различия применявшихся длин волн света в разных установках для измерения ПФЭ.

Список литературы

- [1] *Jastrzebski L., Henley W., Nuese C. J.* // Solid State Technology. 1992. V. 5. N 27. P. 27–33.
- [2] *Istratov A.A., Hieslmair H., Weber E.R.* // Appl. Phys. A. 2000. V. 70. N 5. P. 489–534.
- [3] *Skidanov V.A.* // Defect and Diffusion Forum. 2010. V. 297–301. P. 495–501.
- [4] *Giesecke J.A., Schubert M.C., Walter D., Warta W.* // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 97 P. 092 109.
- [5] *Kiliani D., Micard D., Steuer B. et al.* // J. Appl. Phys. 2011. V. 110. N 5. P. 054 508.