

УДК 537.311.33: 389.6

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ (Обзор)

© С. П. Кобелева¹*Статья поступила 26 июля 2006 г.*

Обсуждаются методы измерения удельного электрического сопротивления и времени жизни неравновесных носителей заряда в монокристаллическом кремнии с точки зрения выполнения требований стандартов ASTM, принятых за основу в SEMI. Рассмотрены работы, направленные на расширение области применения этих стандартов и на повышение точности используемых методик.

Монокристаллический кремний является основным материалом микроэлектроники. Электрофизическими параметрами, контролируруемыми при выращивании слитков и при изготовлении из них пластин для нужд микроэлектроники, являются удельное электрическое сопротивление (ρ) и время жизни неравновесных носителей заряда (τ). Оба параметра определяют марку материала. Измерение этих параметров является необходимым элементом технологического и выходного контроля качества пластин и слитков, входного контроля качества пластин при производстве полупроводниковых приборов и микросхем и частью технологического контроля при изготовлении эпитаксиальных и диффузионных слоев для производства полупроводниковых приборов и интегральных схем.

Глобализация экономики привела к необходимости создания международной системы стандартов, регулирующих методы измерения. В полупроводниковой отрасли координацию деятельности по созданию такой системы проводит Международная организация производителей и потребителей полупроводниковой продукции SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International). В области стандартизации методик измерений этой организацией принята система стандартов США ASTM (American Society for Testing and Materials), как наиболее полная из государственных систем стандартов.

Целью данной статьи является обзор методик измерения ρ и τ , включенных в систему стандартов ASTM, и работ, направленных на расширение области применения методик или повышение точности оценок параметров полупроводникового кремния.

Четырехзондовый метод измерения ρ с линейным расположением зондов

Существует довольно много вариантов измерения ρ в полупроводниках [1 – 4]. Их можно разделить на контактные и бесконтактные. К середине 90-х годов прошлого столетия выделились 4 метода, в основном используемые в производственных целях [1]. Именно они включены в систему международных стандартов методов измерений. Это контактные методы — двухзондовый метод измерения для контроля объемных материалов (используется на этапе контроля качества поликристаллического кремния), четырехзондовый метод (контроль качества объемных материалов, пластин и слоев с p/n -переходами), измерение сопротивления растекания (контроль распределения примеси в диффузионных и эпитаксиальных слоях) и бесконтактный метод вихревых токов.

Четырехзондовый метод признан арбитражным. В данном методе для определения удельного электрического сопротивления используют четырехзондовое устройство с линейным расположением зондов. Постоянный ток пропускают через образец между внешними зондами и измеряют возникающую разность потенциалов между внутренними зондами. Удельное электрическое сопротивление вычисляется из измеренных значений разности потенциалов и тока с применением поправочных коэффициентов на геометрию образца. Теория метода хорошо разработана [2 – 4]. В отечественном стандарте [5] определены общие требования к установкам для измерения этим методом монокристаллических слитков германия и кремния, приведены температурные поправки, которые позволяют проводить измерения в центре слитков в интервале $23 \pm 5^\circ\text{C}$, в стандарте [6] — требования для измерения монокристаллических слитков кремния при фиксированной температуре.

¹ Московский государственный институт стали и сплавов, Москва, Россия.

рованной температуре 23 ± 2 °С и рекомендации по определению разброса ρ по торцу слитка.

В системе стандартов ASTM требования к оборудованию и методикам измерения и расчета ρ четырехзондовым методом изложены в 5 стандартах. В [7] описаны общие требования к оборудованию для двух- и четырехзондовых методов измерения ρ германия и кремния, в [8] изложены требования к оборудованию, подготовке образцов для измерения, методикам расчета ρ круглых кремниевых пластин толщиной до одного межзондового расстояния, т. е. примерно до полутора миллиметров. Диаметр пластин D должен более чем в десять раз превышать среднее межзондовое расстояние s , а разброс значений толщины $\leq 0,55$ % от диаметра пластины. В [9] изложены рекомендации по определению распределения ρ по диаметру пластин монокристаллического кремния, толщина которых меньше половины среднего межзондового расстояния, а диаметр D составляет не менее 15 мм (0,6 дюйма). В [10] описаны методики калибровки и проверки измерительной аппаратуры с использованием стандартных образцов, в [11] — требования к аппаратуре и методики расчета поверхностного сопротивления эпитаксиальных, диффузионных и ионно-имплантированных слоев.

Наиболее общие требования к измерительной аппаратуре: затемнение, если не доказано, что освещение не влияет на результаты измерений; экранировка, если оборудование расположено вблизи высокочастотных генераторов; минимизация токов для исключения инжекции носителей через контакт и возникновения термоэдс; расчет ρ по среднему сопротивлению R при двух полярностях тока; обязательный учет поправок на температуру, если образец не термостабилизирован. Эти поправки справедливы, если температура образца во время измерений поддерживается постоянной в пределах $18 - 28$ °С.

Поскольку формулы расчета величины ρ зависят от размеров образца, в стандартах очень четко регламентированы различные поправки для точных расчетов. Расчет проводится, согласно рекомендациям [7, 8], по обобщенной формуле

$$\rho = F(D/s) F(d/s) F(t) R, \quad (1)$$

где $F(D/s)$ — поправочный коэффициент на диаметр образца; $F(d/s)$ — коэффициент, зависящий от толщины образца; $F(t)$ — поправочный коэффициент на температуру образца; d — толщина пластины.

В соответствии с рекомендациями [7] для $d/s > 2,5$ $F(D/s) = 1$. В остальных случаях для центра образца

$$F(D/s) = \frac{\ln 2}{\ln 2 + \ln \frac{(D/s)^2 + 3}{(D/s)^2 - 3}}; \quad (2)$$

$F(d/s)$ зависит от толщины образца:

$$\text{при } d/s < 0,1 \quad F(d/s) = \pi d / \ln 2,$$

$$\text{при } 0,1 < d/s \leq 4 \quad F(d/s) = 2\pi s / F_{k1}(d/s), \quad (3)$$

$$\text{при } d/s > 4 \quad F(d/s) = 2\pi s \text{ (формула стандартов [5, 6]).}$$

Поправочный множитель $F_{k1}(d/s)$ рассчитывается по формуле [8]

$$F_{k1}(d/s) = 1 + 2 \sum \left\{ \left[\frac{1}{4} + \left(\frac{nd}{s} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \left[1 + \left(\frac{nd}{s} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} + \sum \left[\frac{3}{4} \left(\frac{s}{nd} \right)^3 - \frac{45}{64} \left(\frac{s}{nd} \right)^5 + \frac{315}{512} \left(\frac{s}{nd} \right)^7 \right], \quad (4)$$

первое суммирование ведется по n от 1 до M , где M — целая часть $(2s/d) + 1$, второе суммирование — от $M + 1$ до N , где N — наименьшее значение n , для которого второе слагаемое меньше 10^{-5} .

Поправочный коэффициент на температуру образца

$$F(t) = 1 - C_t (t - 23), \quad (5)$$

где t — температура образца в градусах по шкале Цельсия; C_t — температурный коэффициент, заданный в виде графика [7], в виде таблицы [8], рассчитывается по формуле [10].

На рис. 1 приведены зависимости от ρ коэффициента C_t стандартов ASTM и ГОСТ. Зависимости в ГОСТе грубо округлены. Различие величин, установленных в ГОСТ и ASTM, достигает 30 %.

Однородное распределение ρ по пластине является важным параметром качества. Стандарты ASTM не регламентируют величину разброса, оставляя это на усмотрение поставщиков и потребителей. Достаточно сказать, что для современных субмикронных технологий требуются пластины большого диаметра (от 200 мм и выше) с разбросом ρ до 1 %. Это накладывает серьезные требования к аппаратуре, и к методикам расчета ρ на различном расстоянии от центра пластин. Поэтому в стандарте [9] для измерения распределения ρ по диаметру

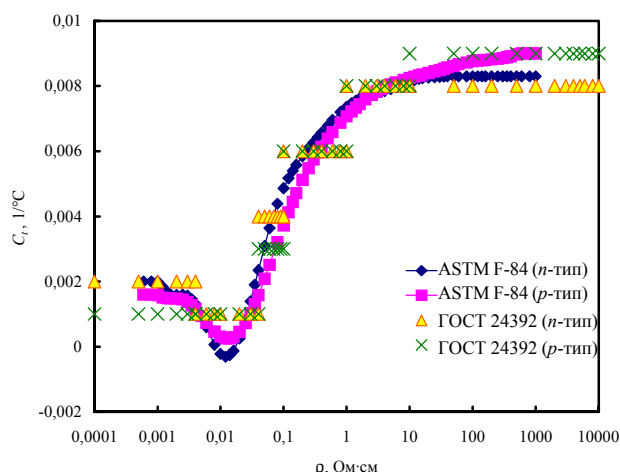


Рис. 1. Зависимость температурного коэффициента C_t от удельного электросопротивления ρ

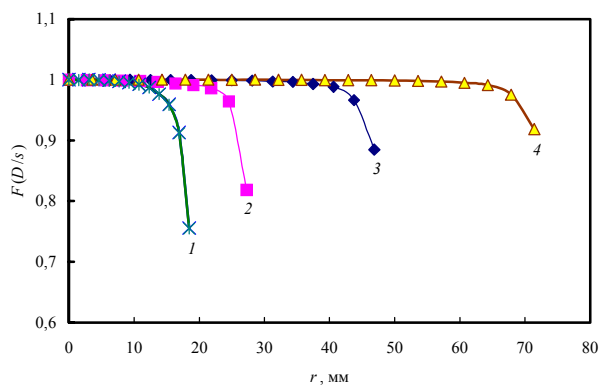


Рис. 2. Поправка $F(D/s)$ в зависимости от положения измерительной головки на пластине: 1 – 4 — $D = 40, 60, 100, 150$ мм соответственно

введена поправка $F(D/s)$, зависящая и от расстояния точки измерения до центра пластины. Поправка задается таблично. На рис. 2 приведена поправка для пластин с $d = 300$ мкм, $s = 1,3$ мм диаметрами 40, 60, 100 и 150 мм. Толщина пластины не влияет на величину поправки (на рис. 2 для диаметра 40 мм приведены расчеты для $d = 300$ и 600 мкм). Видно, что на расстоянии 5 мм от края пластины систематическая погрешность расчета достигает 5 %, если поправку не учитывать.

Четырехзондовый метод можно считать самым регламентированным и самым точным, поэтому только он рекомендован как арбитражный, а также для определения марки кремния при продаже материала. Проведенные межлабораторные сличения [8] показали, что среднеквадратичное отклонение (СКО) измеренных величин ρ в доверительном интервале 0,95 % не превышает 1,7 %. Четырехзондовый метод можно использовать и для определения распределения ρ вдоль образующей слитков

монокристаллического кремния, при этом необходимо учитывать поправки на концах слитков [1, 3].

Метод считается неразрушающим, так как не требует специальной подготовки, кроме шлифовки и очистки поверхности от загрязнений, нарушенного слоя и поверхностного оксида, что можно считать рутинной производственной процедурой. Однако при измерении тонких слоев в местах прижимов зондов образуются локальные разрушения, препятствующие созданию приборов в этих областях. Поэтому неразрушающим метод можно считать только в случае оценки качества объемных материалов. При измерении удельного или поверхностного сопротивления пластин с p/n -переходами погрешность метода увеличивается. Так, величины СКО при межлабораторных сличениях достигают 30 % [11]. Локальность метода определяется межзондовым расстоянием и составляет миллиметры по поверхности и по глубине, его можно использовать для измерения профиля распределения примеси в диффузионных и эпитаксиальных слоях, если применять послойное шлифование или измерения проводить на косом шлифе. Однако применять его целесообразно только для структур с глубокими p/n -переходами.

Метод сопротивления растекания

Переход на субмикронные и наноразмерные технологии вызвал необходимость применения локальных по глубине и поверхности пластин методов измерения ρ . Таким методом, в настоящее время динамично развивающимся, является метод измерения сопротивления растекания (СР). Он основан на измерении сопротивления структуры, состоящей из полупроводникового образца и металлического зонда, установленного на его плоской поверхности [1, 2]. Через измерительный зонд пропускается ток I и на нем же определяется потенциал U по отношению к удаленному контакту, сопротивлением которого пренебрегают. Расчеты показывают, что в идеальном случае в полубесконечном образце $R = U/I = \rho/(4r_0)$, где r_0 — радиус закругления точечного контакта. Область, в которой анализируется удельное сопротивление, имеет размеры порядка удвоенного радиуса контактной площадки зонда и может быть доведена до нанометровых размеров. Поэтому в настоящее время приставки СР устанавливаются в атомно-силовых и туннельных микроскопах. Однако в реальности величина удельного электрического сопротивления в этом методе рассчитывается с учетом поправочного коэффициента, который зависит от множества факторов. Имеется 3 стандарта ASTM, регламентирующие применение этого метода [12 – 14]. В [12]

приведены общие требования к измерительной аппаратуре для измерения объемных материалов, в [13] — требования к аппаратуре и процедуре измерения распределения СР по косому шлифу, в [14] — к подготовке косых шлифов для измерений СР. Величины поправок не обсуждаются, так как они зависят от размеров и качества контактной площадки зондов, силы прижима, скорости опускания зондов, типа электропроводности и величины измеряемого удельного сопротивления. Нет данных по межлабораторным сличениям. Приведенные в [13] результаты измерения СР различными лабораториями (данные по расчетам ρ не приведены) имеют большой разброс (СКО до 30 %), что свидетельствует о необходимости совершенствования как аппаратурной части, так и методов калибровки и расчета ρ .

В работе [15] описаны результаты межлабораторных сличений измерений СР 22 ионно-имплантированных образцов, профили распределения которых контролировали методом вторично-ионной масс-спектрометрии. Измерения проводили в 21 лаборатории. Результаты этой работы показали необходимость развития в первую очередь прикладных программ расчетов профилей распределения ρ и на их основе определения концентрации мелких примесей N , поскольку в ряде случаев, особенно для субмикронных слоев, стандартные формулы перевода удельного сопротивления в концентрацию [16] в этом методе неприменимы. В основе расчета распределения ρ по глубине неоднородного образца по результатам измерения СР лежит модель Шумана [17]. Основные направления совершенствования модели расчетов связаны с учетом деформации кремния в области контакта [18], неидеальности точечного контакта [19 – 21], уменьшения подвижности свободных носителей заряда (μ) за счет деформации [18], а также с учетом поверхностных состояний на косом шлифе и на границах раздела структур [18, 19, 22].

Необходимым элементом современных моделей является учет эффекта спиллинга — изменения распределения концентрации свободных носителей за счет диффузии в области больших градиентов концентрации примеси [15, 19]. Этот эффект приводит к тому, что возникают локальные электрические поля, концентрации легирующей примеси и свободных носителей заряда не совпадают и нельзя пользоваться рекомендациями стандарта [16] для пересчета ρ в N .

Активно развивается нано-СР [21 – 24]. В работе [22] предложена аппаратура, которая позволяет измерять концентрации примесей в широком динамическом интервале $10^{14} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$ с пространственным разрешением 10 нм и высокой чувствительностью. Обсуждается возможность субдесятинанометрового разрешения [21], построения двумерных

профилей распределения примеси [23, 24]. С помощью низкотемпературных [25] и высокотемпературных [26] измерений СР предлагается оценивать глубину залегания примеси в запрещенной зоне полупроводника, т. е. заменить этими измерениями метод емкостной спектроскопии глубоких уровней.

Метод вихревых токов

Описанные выше методы обладают большим недостатком — по существу, являются разрушающими, имеют недолгий срок работы зондов, они очень чувствительны к обработке поверхности перед измерениями, к материалу и геометрии зонда и силе прижима зонда к поверхности. Этих недостатков лишены высокочастотные бесконтактные методы измерения ρ . Стандартом [27] рекомендован метод вихревых токов, основанный на индуктивной связи образца с измерителем. Диапазоны измеряемых значений ρ от 0,001 до 200 Ом·см, толщины пластин от 0,1 до 1 мм. Эти диапазоны могут быть сужены, так как не при всех сочетаниях толщины и ρ можно проводить измерения.

Частота генератора должна обеспечивать глубину проникновения ВЧ поля, по крайней мере, в 5 раз больше толщины образца. В этом методе образец определенной геометрической формы помещается между катушками индуктивности, при этом изменяется добротность ВЧ контура. Необходимо, чтобы выходной сигнал (в стандарте предполагается, что это ток ВЧ генератора, который поддерживает фиксированное значение выбранного контролируемого параметра) был пропорционален проводимости образца. Расчет ρ проводят по калибровочным кривым. В стандарте приведены результаты межлабораторных сличений. Величина СКО составила для интервала 0,003 – 30 Ом·см — $\pm 9\%$, 0,003 – 90 Ом·см — $\pm 15\%$, 90 – 125 Ом·см — $\pm 18\%$. Как видно из результатов, точность метода значительно ниже, чем у четырехзондового, но он незаменим для использования в различного рода автоматических сортерах — как пластин и эпитаксиальных слоев, так и структур типа кремний-на-изоляторе, для отбраковки скраба при производстве монокристаллического кремния и других подобных технических задач.

Методы измерения времени жизни неосновных носителей заряда

К настоящему времени разработано и исследовано значительное число методов измерения времени жизни неравновесных носителей заряда [1 – 3], что объясняется несколькими причинами. Влияние времени жизни на формирование параметров

приборов весьма разнообразно, уменьшение его величины повышает быстродействие диодов, а для повышения эффективности работы фотоприемников и солнечных батарей требуются иногда предельно высокие значения τ . Освоение технологии какой-либо новой полупроводниковой структуры часто приводило к разработке специального для данной структуры метода оценки τ в исходном материале. Однако по мере совершенствования технологии производства приборного кремния, а также уменьшения числа типов структур резко сократилась разработка новых методов измерения τ .

Все методы можно разделить на 3 основные группы: модуляции проводимости за счет подсветки (фотопроводимость) или инъекции носителей через контакт; измерения параметров приборных структур; использование других физических эффектов, параметры которых зависят от τ . При выборе метода измерения времени жизни немаловажным фактором является сравнительная сложность аппаратуры и ее стоимость.

Для монокристаллического кремния в основном используются методы, относящиеся к первой группе. Она, в свою очередь, подразделяется на две — стационарные и нестационарные методы. К стационарным относятся все методы измерения диффузионной длины L и несколько вариантов измерения стационарной фотопроводимости, в том числе спектральной зависимости фотопроводимости. Поскольку сигнал фотопроводимости слаб, используют методы модуляции проводимости с разной формой засвечивающих импульсов и различные формы детектирования переменных сигналов, что и порождает разнообразие конкретных аппаратурных исполнений метода. К нестационарным относят измерение спада фотопроводимости контактными и бесконтактным СВЧ методами; фазовый и частотный методы; измерение спада сигнала ИК-поглощения; метод модуляции проводимости в точечном контакте.

В настоящее время промышленно изготавливается оборудование для использования в производственных целях на основе четырех основных методик [1]: два метода позволяют измерять диффузионную длину — методы поверхностной фотоэ.д.с. (ПФЭ) и обратного фототока (ОФТ), два метода основаны на измерении спада фотопроводимости — контактный и бесконтактный (СВЧ). Эти методы, кроме ОФТ, включены в систему стандартов ASTM.

Для монокристаллического кремния в диапазоне от 0,1 до 500 Ом·см в соответствии с ГОСТ [6] τ в слитках измеряют методом модуляции проводимости в точечном контакте (метод Шпицера) [2 – 4]. На основе компьютерного моделирования основных методов измерения τ в приборных полупроводниковых структурах с p/n -переходом в работе [28] было

показано, что не существует экспериментального метода, позволяющего адекватно определить τ в приборных структурах. В аналогичном исследовании по моделированию метода Шпицера [29] с использованием параметров измерительной аппаратуры, удовлетворяющих требованиям ГОСТа [6], было получено, что погрешность определения τ данным методом может превосходить 50 %. Был сделан вывод, что метод Шпицера можно оценить как чисто качественный, предназначенный для сравнения однотипных образцов.

Для измерений τ методом затухания фотопроводимости [30] рекомендуется использовать образцы в виде бруска стандартных размеров. На торцах бруска изготавливают омические контакты. Значение τ находится из анализа записи сигнала спада фотопроводимости $U_{\phi}(t)$:

$$U_{\phi}(t) = \frac{I}{\sigma(t)} = \frac{I}{\sigma_0 + \Delta\sigma(t)} = \frac{I\rho_0}{1 + \sigma(t)/\sigma_0}, \quad (6)$$

где I — интенсивность светового потока; $\sigma(t)$ — фотопроводимость образца; ρ_0 и σ_0 — равновесные удельное сопротивление и электропроводность образца.

Если $\sigma(t)/\sigma_0 \ll 1$, то

$$U_{\phi}(t) \approx I\rho_0 \left[1 - \frac{\sigma(t)}{\sigma_0} + \frac{(\sigma(t)/\sigma_0)^2}{2} + \dots \right]. \quad (7)$$

Стандарт [30] ограничивает область применения данного метода только низкими уровнями инъекции ($\sigma(t)/\sigma_0 < 0,1$). В этом случае в (7) можно ограничиться первыми двумя членами и

$$U_{\phi}(t) \sim \frac{\sigma(t)}{\sigma_0} \sim \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right). \quad (8)$$

Для $0,1 < \sigma(t)/\sigma_0 < 1$ в стандарте вводится поправка, рассчитанная на основе учета следующих членов разложения (7).

Для всех методов измерения времени жизни наиболее существенной является задача оценки влияния поверхностной рекомбинации на результат измерений. Экспериментами установлено, что скорость рекомбинации на поверхности S зависит от ее физического состояния. Эффективное время жизни носителей заряда $\tau_{\text{эф}}$, которое и определяется экспериментально в нестационарных методах, можно оценить по формуле

$$\tau_{\text{эф}} = \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_n} \right)^{-1}, \quad (9)$$

где τ_n — время жизни вследствие рекомбинации на поверхности.

Если исследуемый образец имеет конечные размеры и идет рекомбинация на поверхности, то спад фотопроводимости не может характеризоваться только одной «постоянной времени» экспоненциального затухания. На релаксационной кривой появляются «короткоживущие» составляющие. Их количество и вид определяются конкретными характеристиками исследуемого образца. В стандарте [30] специально оговаривается, что поверхность образца должна быть шероховатая, т. е. иметь максимальную скорость рекомбинации. В случае бесконечной скорости поверхностной рекомбинации максимальная величина τ_n известна и составляет $d^2/\pi D$ [2]. На основании этого в стандарте рассчитаны поправки, которые позволяют определить объемное время жизни более точно.

Ниже приведены рекомендованные размеры образцов прямоугольной формы для измерения τ по спаду фотопроводимости контактным методом и максимальные значения времени жизни, которые могут быть измерены на данных образцах:

Длина, мм	Ширина, мм	Толщина, мм	τ , мкс, <i>p</i> -Si	τ , мкс, <i>n</i> -Si
15	2,5	2,5	90	240
25	5	5	350	1000
25	10	10	1300	3800

В [30] предусматривается засветка либо редкими мощными и короткими импульсами (метод А), либо периодически следующими более длительными импульсами (метод В). В первом случае объектами изучения являются образцы с большими значениями объемного времени жизни (>100 мкс), мощные короткие импульсы обеспечивают первоначальное распределение неравновесных носителей заряда без влияния поверхностной рекомбинации. Для варианта А приведена величина СКО $\pm 135\%$, полученная в результате межлабораторных сличений.

Кремниевые пластины перед решающими операциями диффузии или ионной имплантации полируются и окисляются. Для измерения времени жизни на таких пластинах рекомендуется бесконтактный СВЧ метод [31]. Он предусматривает генерацию избыточных носителей заряда световыми импульсами и наблюдение за процессом спада фотопроводимости по отражению от образца (пластины) электромагнитной волны в диапазоне СВЧ. В стандарте указывается, что метод применяется только для пластин с пассивированной поверхностью. Для засветки рекомендуется использовать мощные импульсные источники, в частности полупровод-

никовый лазер. Мощный короткий импульс, как и в предыдущем методе, необходим для создания наиболее однородного первоначального распределения неравновесных носителей заряда. Локализация засветки в пределах небольшой площадки (до 1×1 мм²) позволяет получать пространственное распределение значений времени жизни в пластине, что невозможно в других методах.

В стандарте [31] в СВЧ приемо-передающей системе рекомендуется использовать рабочую частоту 10 ГГц ($\lambda = 3$ см). Предлагается использовать [31] данный метод с существенными ограничениями, не являющимися неизбежными по существу дела, а лишь упрощающими интерпретацию результатов измерений:

- только для пластин (легко соблюдается условие однородной генерации по толщине);

- для большой области засветки, хотя это в явном виде и не указывается, чтобы на результаты не влияла боковая диффузия;

- только для пассивированных поверхностей (условие является, по существу, следствием первого, так как поверхностная рекомбинация при больших временах жизни делает невозможным измерение тонких пластин);

- использование импульсных источников (необходимо для уменьшения влияния поверхностной рекомбинации на результаты, что с учетом третьего ограничения представляется несущественным);

- обработке подлежит только вторая половина кривой спада фотопроводимости (уменьшается влияние высших гармоник, связанных с поверхностной рекомбинацией, и переходных процессов в СВЧ контуре, возникающих при выключении засветки).

В отсутствие заметной поверхностной рекомбинации тангенс угла наклона логарифма сигнала спада во второй половине релаксационной кривой дает искомую величину объемного времени жизни.

Можно отметить несколько неоспоримых преимуществ СВЧ метода. Это единственный метод полностью неразрушающего контроля образцов, которые могут направляться на дальнейшие технологические операции без сложной очистки. Четкая локализация поля СВЧ и засвечивающего импульса позволяет осуществить сканирование и получить пространственное распределение параметров рекомбинационных процессов в образце (пластине). Получение результатов измерений практически мгновенное. Возможно измерение образцов любой формы, в том числе и слитков. Влияние поверхностной рекомбинации на толстых образцах минимально, что облегчает интерпретацию результатов измерений.

Основной недостаток метода — необходимость пассивации поверхности образца для исключения заметного влияния рекомбинации на результат измерения, особенно для измерения пластин. Официально признается стандартом ASTM его применение только для полированных и пассивированных пластин кремния. Допускается использование метода для образцов иной формы, в том числе слитков, но процедуры измерений не регламентируются. Рекомендуются ориентироваться при этом на критерии воспроизводимости результатов измерений и их согласованность с интересами поставщика и покупателя материала.

Разработке методик расчета объемного времени жизни и скорости поверхностной рекомбинации на непассивированных образцах посвящено в последние годы много работ, см., например, [32 – 35].

Поверхностная рекомбинация формально не влияет на результаты измерения диффузионной длины неосновных носителей заряда по значению стационарной поверхностной фотоэ.д.с. На освещенной поверхности полупроводника, толщина которого заметно больше L , избыточная концентрация неравновесных носителей заряда $\Delta n(0)$ определяется выражением [3]

$$\Delta n(0) = \frac{I\alpha(\lambda)\tau L}{(L + S\tau)(\alpha(\lambda)L + 1)} = \frac{I\tau L}{(L + S\tau)(L + 1/\alpha(\lambda))}, \quad (10)$$

где $\alpha(\lambda)$ — коэффициент поглощения на длине волны λ .

Если в приповерхностной области имеется встроенное электрическое поле, избыточные носители заряда этим полем разделяются, и возникает поверхностная э.д.с. Разность потенциалов объема и поверхности будет максимальна, если за счет встроенного поля возникает обедненная область или инверсный слой. При низком уровне инжекции $\Delta n(0)$ связана с поверхностным потенциалом $U(0)$ выражением

$$\Delta n(0) \sim \exp\left(\frac{e\delta U}{kT}\right) \sim \frac{e\delta U}{kT}, \quad (11)$$

где δU — потенциал поверхности по отношению к объему, появившийся за счет освещения; e — заряд электрона; k — константа Больцмана; T — температура образца.

Согласно (10, 11), $1/\delta U = 0$, если $1/\alpha = -L$, поэтому в первом варианте измерений экстраполяция зависимости $1/\delta U$ от $1/\alpha$ к нулю позволяет опре-

делить L . Принципиальным условием в этом случае является поддержание постоянной интенсивности засветки ($I = \text{const}$). Зная коэффициент диффузии D , можно рассчитать τ ($L = \sqrt{D\tau}$).

Поверхностная рекомбинация формально не влияет на результаты измерений, если S не меняется в процессе измерения. Это гарантированно реализуется при постоянной величине $\Delta n(0)$. В погрешность измерения δU может вносить вклад э.д.с. Дембера (возникновение положительного заряда на поверхности за счет большей подвижности у избыточных электронов). Эффект Дембера пропорционален избыточной концентрации, и его влияние можно также снизить, проводя измерения при постоянной $\Delta n(0)$ на поверхности. Для этого реализуется второй вариант измерений — величина δU поддерживается постоянной при различных коэффициентах поглощения и строится зависимость интенсивности засветки от обратного коэффициента поглощения. Экстраполяция к нулю зависимости $I(1/\alpha)$ и в этом случае дает величину L .

Существенным ограничением метода поверхностной фотоэ.д.с. является достаточно узкий интервал удельного сопротивления материала ($0,1 < \rho < 50$ Ом·см), его практическая реализация требует решения ряда технических задач:

1. Требуется источник света с монохроматическим излучением и возможностью перестройки длины волны. Степень монохроматичности должна быть достаточно высокая, так как коэффициент поглощения излучения очень сильно зависит от длины волны.

2. Вся поверхность образца должна засвечиваться однородно во избежание влияния боковой диффузии на результаты измерения.

3. Необходимо поддержание неизменной интенсивности засветки при смене длины волны источника.

4. Поскольку источников погрешностей в методе достаточно много и большинство из них влияет на линейность анализируемой зависимости, стандарт [36] требует измерения для 4 – 6 значений α , что существенно усложняет аппаратуру и сам процесс измерения.

Данный метод измерения диффузионной длины считается неразрушающим. Однако в ряде случаев сигнал столь слаб, что приходится подвергать исследуемый образец специальной обработке для повышения достоверности измерений. Кроме того, метод дает правдоподобные результаты лишь в том случае, когда приповерхностный (освещаемый) слой кремния свободен от механических повреждений. Поэтому рекомендуется исследуемый образец подвергать химической полировке.

В системе отечественных технических регламентов (ГОСТ, ОСТ, ТУ) методики измерения изложены в приложениях к техническим условиям на полупроводниковую продукцию (исключение составляет ГОСТ [5]), что резко отличает ее от международной. В 70 – 80-е годы в СССР на монокристаллический кремний были разработаны 2 ГОСТа, 1 ОСТ и 14 ТУ, и только 4 из последних продлены в настоящее время. Действие этих методик ограничено не только уровнем отраслевых документов, но и тем, что в них часто указан конкретный прибор и инструкция по его эксплуатации. Выполнение закона РФ “О единстве средств измерений” требует создания современной метрологической документации для полупроводниковой отрасли, в основу которой могут быть положены стандарты SEMI, тем более что интеграция России в мировую систему производства и потребления полупроводниковой продукции требует обязательной гармонизации отечественных и международных стандартов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Runyan W.R., Shaffner T.J. Semiconductor measurements & instrumentation. — N.Y.: McGraw-Hill, 1998. — 454 p.
2. Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. — М.: Высшая школа, 1987. — 239 с.
3. Батавин В.В., Концевой Ю.А., Федорович Ю.В. Исследование параметров полупроводниковых материалов и структур. — М.: Радио и связь, 1985. — 264 с.
4. Ковтонюк Н.Ф., Концевой Ю.А. Измерение параметров полупроводниковых материалов. — М.: Металлургия, 1970. — 83 с.
5. ГОСТ 24392–80. Кремний и германий монокристаллические. Измерение удельного электрического сопротивления четырехзондовым методом. — М.: Изд-во стандартов, 2001. — 7 с.
6. ГОСТ 19658–82. Кремний монокристаллический в слитках. — М.: Изд-во стандартов, 1990. — 69 с.
7. ASTM F-43. Test Methods for Resistivity of Semiconductor Materials. Annual Book of ASTM Standard. V.10.05.
8. ASTM F. Test Methods for Measuring Resistivity of Silicon Wafers with an In-Line Four-Point Probe. Annual Book of ASTM Standard. V.10.05.
9. ASTM F-81. Method for Measuring Radial Resistivity Variation on Silicon Slices. Annual Book of ASTM Standard. V.10.05.
10. ASTM F-1527. Guide for Application of Silicon Standard Reference Materials and Reference Wafers for Calibration and Control of Instruments for Measuring Resistivity of Silicon. Annual Book of ASTM Standard. V.10.05.
11. ASTM F-374. Test Method for Sheet Resistance of Silicon Epitaxial, Diffused, Polysilicon, and Ion-Implanted Layers Using an In-Line Four-Point Probe. Annual Book of ASTM Standard. V.10.05.
12. ASTM F-525. Method for Measuring Resistivity of Silicon Wafers Using a Spreading Resistance Probe. Annual Book of ASTM Standard. V.10.05.
13. ASTM F-672. Test Method for Measuring Resistivity Profiles Perpendicular to the Surface of a Silicon Wafer Using a Spreading Resistance Probe. Annual Book of ASTM Standard. V.10.05.
14. ASTM F-674. Practice for Preparing Silicon for Spreading Resistance Measurements. Annual Book of ASTM Standard. V.10.05.
15. Clarysse T., Vandervorst W. / J. Vac. Sci. Technol. 1998. V. 16(1). P. 260–270.
16. ASTM F-723. Practice for Conversion Between Resistivity and Dopant Density for Boron-Doped and Phosphorus-Doped Silicon. Annual Book of ASTM Standard. V.10.05.
17. Schumann P.A., Gardner E.E. / J. Electrochem. Soc.: Solid State Science. 1969. V. 116. P. 87.
18. Clarysse T., Vandervorst W., Pawlik M. / J. Vac. Sci. Technol. 1996. V. 14(1). P. 390–396.
19. Clarysse T., Vandervorst W. / J. Vac. Sci. Technol. 2000. V. 18(1). P. 393–400.
20. Hartford E.J., Ramey S.M., Ye C.W. et al. / J. Vac. Sci. Technol. 2000. V. 18(1). P. 401–404.
21. Clarysse T., Eyben P., Hantschel T., Vandervorst W. / Materials Science in Semiconductor Processing. 2001. V. 4. P. 61–66.
22. Masaya Ichimira, Shinya Ito, Eisuke Arai / Solid-State Electronics. 2002. V. 46. P. 545–553.
23. De Wolf P., Clarysse T., Vandervorst W. et al. / J. Vac. Sci. Technol. 1996. V. 14(1). P. 380–385.
24. Privitera V., Saggio M.G. / J. Vac. Sci. Technol. 1996. V. 14(1). P. 369–371.
25. Voss S., Bracht H., Stolwijk N.A. / Physika. 1999. V. 273–274. P. 561–564.
26. Voss S., Bracht H., Stolwijk N.A. / Materials Science in Semiconductor Processing. 2001. V. 4. P. 67–70.
27. ASTM F-673. Test Method for Measuring Resistivity of Semiconductor Slices or Sheet Resistance of Semiconductor Films with a Noncontact Eddy-Current Gage. Annual Book of ASTM Standard. V.10.05.
28. Мнацаканов Т.Т., Ростовец И.Л., Филатов И.Н. Новые силовые полупроводниковые приборы и технология их изготовления / Под ред. А. Н. Думаневича. — М.: ВЭИ, 1991. С. 131–133.
29. Горюнов Н.Н., Клебанов М.П., Кобелева С.П. и др. / Тезисы Второй Российской школы ученых и молодых специалистов по материаловедению и технологиям получения легированных кристаллов кремния. — М.: МИСиС, 2001. С. 85.
30. ASTM F-28. Test Methods for the Minority-Carrier Lifetime in Bulk Germanium and Silicon by Measurement of Photoconductivity Decay. Annual Book of ASTM Standard. V.10.05.
31. ASTM F-1535. Test Method for Carrier Recombination Lifetime in Silicon Wafers by Noncontact Measurement of Photoconductivity Decay by Microwave Reflectance. Annual Book of ASTM Standard. V.10.05.
32. Горюнов Н.Н., Калинин В.В., Слесарев В.Н. и др. / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2004. Т. 70. № 6. С. 23–27.
33. Brody J., Rohatgi A., Ristow A. / Solar Energy Materials & Solar cells. 2003. V. 77. P. 293–301.
34. Бородавский П.А., Булдыгин А.Ф., Токарев А.С. / Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38. Вып. 9. С. 1043–1049.
35. Кобелева С.П., Юрчук С.Ю., Ярыничак М.В. и др. / Известия вузов. Материалы электронной техники. 2006. № 4. С. 17–20.
36. ASTM F-391. Test Methods for Minority-Carrier Diffusion Length in Extrinsic Semiconductors by Measurement of Steady-State Surface Photovoltage. Annual Book of ASTM Standard. V.10.05.