

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКАЯ РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ – ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР

Д-р Ж.-Ф.Пиел

Для исследования свойств материалов широко используется спектроскопическая рефлектометрия – неразрушающий метод, основанный на анализе распространения электромагнитных волн в веществе. Если на пути потока излучения встречается неоднородность, часть энергии отражается в направлении источника. Отраженный сигнал содержит полезную информацию о свойствах физической системы – в особенности о толщине тонких слоев. Поэтому метод успешно применяют для анализа многослойных структур, например, трехмерных (3D) интегральных схем. О реализации и возможностях спектроскопической рефлектометрии рассказывает в статье д-р Жан-Филипп Пиел (J.Ph.Piel), менеджер по развитию метрологии французской компании Fogale nanotech (www.fogale-semicon.com).

ИЗМЕРЕНИЯ

Обычно метод спектроскопической рефлектометрии предусматривает измерение интенсивности отраженного излучения в широком диапазоне длин волн. В большинстве экспериментальных схем применяется неполяризованный свет, падающий под прямым углом. В зависимости от исследуемого материала могут использоваться различные диапазоны электромагнитного спектра: от рентгеновского до дальнего ИК.

Для определения характеристик тонких слоев (10 нм до 50 мкм), как правило, выбирается спектральный диапазон от 300 нм до 1,7 мкм (рис.1), но его можно легко расширить до 2 мкм, если исследуемые слои поглощают видимый свет, как например нелегированный кремний.

Измерения выполняются в два этапа. На первом этапе – калибровки сигнала – используют образец подложки (например, чистый кремний), для которого известен коэффициент отражения $R_{ref}(\lambda)$.

Процедура заключается в получении отраженного сигнала от калибровочного образца: $I_{ref}(\lambda)$. На втором этапе измеряют интенсивность сигнала, отраженного от исследуемого образца: $I_{sample}(\lambda)$. После этого вычисляется абсолютное значение коэффициента отражения в зависимости от длины волны по формуле:

$$R_{sample}(\lambda) = \frac{R_{ref}(\lambda) \cdot I_{sample}(\lambda)}{I_{ref}(\lambda)}$$

В качестве источника излучения обычно используют галогенную и/или дейтериевую лампы (для различных диапазонов длин волн). Излучаемый поток передается через волоконный световод и освещает исследуемый образец (рис.2). Когда необходима малая освещаемая поверхность, применяют микрообъективы, которые фокусируют луч на участок площадью несколько микрон. Отраженный свет собирается в центральном волокне световода и направляется в спектрометр, оснащенный

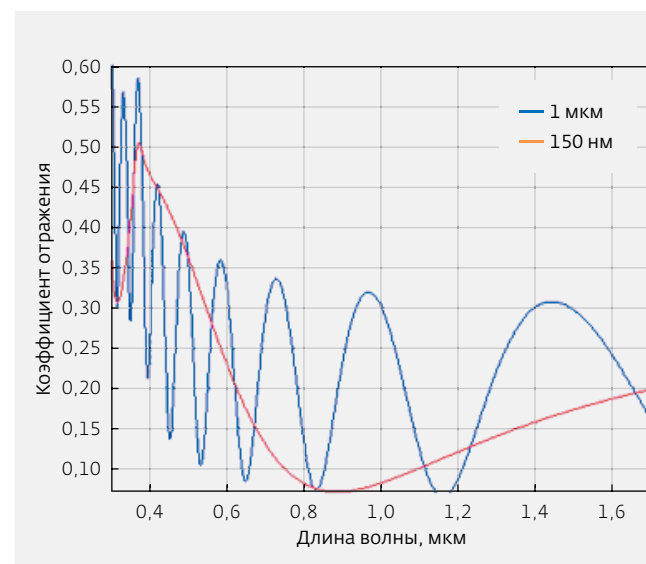


Рис.1. Коэффициенты отражения слоев SiO₂ толщиной 1 мкм и 150 нм на кремниевой подложке

детектором на основе ПЗС (охватывающим спектральный диапазон от 300 до 1100 нм) или InGaAs матричным детектором (спектральный диапазон от 1000 до 2000 нм). Спектр снимается за несколько миллисекунд – в зависимости от требуемого соотношения сигнал/шум.

АНАЛИЗ

Когда измеряемые слои толстые, и отраженные спектры содержат множество осцилляций в диапазоне длин волн (см. рис.1), обычно используется Фурье-преобразование сигнала для определения частот, соответствующих оптической толщине каждого слоя. Затем, зная показатель преломления материала, можно определить физическую толщину слоя.

Однако для тонких слоев толщиной, как правило, менее 150 нм, например, таких как SiO₂ (см. рис.1), преобразование Фурье не подходит. В этом случае измеренная кривая коэффициента отражения сравнивается с теоретической кривой, полученной для многослойной модели. Чтобы минимизировать расстояние между кривыми, приходится варьировать физические параметры модели, такие как толщина слоев. Для этого используется процедура подгонки.

Модель состоит из описания одного или более слоев образца. Для каждого слоя процедура начинается с оценки толщины, затем вводятся величины "n" – показатель преломления и "k" – коэффициент поглощения. Их значения для хорошо известных материалов можно взять из стандартных

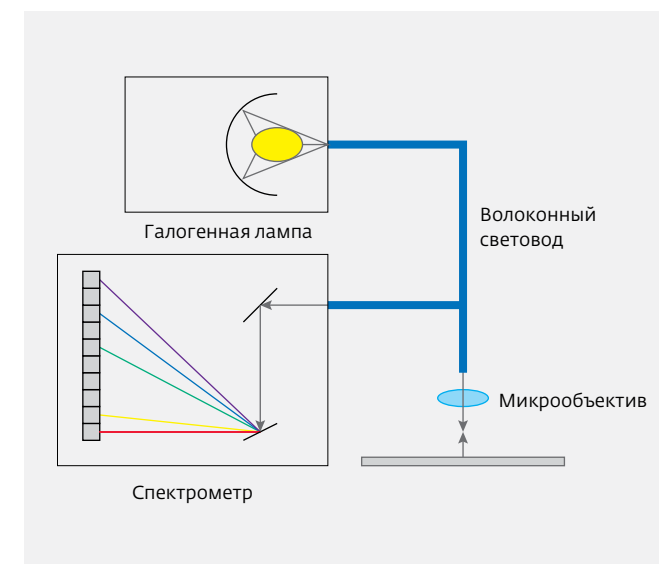


Рис.2. Типовая схема рефлектометра

таблиц. Для других материалов данные величины можно оценить с помощью уравнений, описывающих зависимость n и k от длины волны.

В литературе много примеров таких зависимостей. Например, для диэлектриков обычно рекомендуется использовать формулы Коши ($n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}$) или Зельмейера ($n^2(\lambda) = 1 + \sum_j \frac{B_j \lambda^2}{\lambda^2 - C_j}$).

Для полупрозрачного слоя хорошо подходит зависимость Друде-Лоренца. Когда слои представляют собой физическую смесь двух или более материалов (такую как пористый (с включениями пустот) диоксид кремния), в большинстве случаев применяются приближенные модели теории эффективной среды, например, модель Бруггемана.

Используя эти данные, можно вычислить коэффициенты отражения для каждой границы раздела между слоями. При этом необходимо учитывать многократные отражения и прохождения волн между границами.

В частности, для одного слоя, нанесенного на подложку, суммарный амплитудный коэффициент отражения определяется выражением:

$$r = \frac{r_{01} + r_{1s} \exp(-2i\delta)}{1 + r_{01} r_{1s} \exp(-2i\delta)}$$

где r_{01} и r_{1s} – коэффициенты отражения для поверхностей воздух/слой и слой/подложка соответственно. δ вычисляется по формуле:

$$\delta = 2\pi \frac{t}{\lambda} (N^2 - N_0^2 \sin^2 \phi_0)^{\frac{1}{2}}$$



Рис.3. Система T-MAP DUAL 3D 300A

где t и N – толщина и показатель преломления слоя соответственно, φ_0 – угол падения, для типовой конфигурации эксперимента равный 0.

И, наконец, суммарный коэффициент отражения для модели, описывающей образец, можно рассчитать следующим образом:

$$R = |r|^2.$$

Для получения оптимальных значений определяемых физических параметров, например, толщины слоев, используются специальные процедуры минимизации, как правило, алгоритм Левенберга-Марквардта. Качество минимизации характеризуется коэффициентом, получившим название "точность приближения" (goodness of fit), величина которого изменяется от 0 (плохое совмещение) до 1 (полное совмещение).

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Описанный метод применяется, в частности, в приборах серии T-Мар (рис.3) компании Fogale Nanotech (Франция). T-Мар – семейство систем оптического контроля, позволяющих в реальном времени измерять геометрические параметры одно- и многослойных (например, "кремний на изоляторе") структур, включая толщину, кривизну, высоту рельефа. Системы работают со всеми основными материалами, применяемыми в производстве полупроводниковых приборов, в том числе с кремнием, полупроводниками группы A^3B^5 , сапфиром, стеклом, полимерами и др.

Одна из актуальных областей применения приборов T-Мар – оптический контроль качества трехмерной (3D) интеграции. 3D-интеграция с использованием сквозных переходных отверстий в кремнии (through-silicon via, TSV) – перспективная

технология, обеспечивающая сокращение себестоимости и уменьшение размеров микроэлектронных компонентов при повышении их надежности и энергоэффективности. Широкое внедрение трехмерной интеграции в промышленное производство требует решения ряда проблем, среди которых – контроль качества специфических для 3D-интеграции технологических операций (формирования TSV-соединений, утонения пластины, обработки обратной стороны пластины, сборки стека). Все эти задачи могут решать приборы серии T-Мар. Помимо процессов 3D-интеграции, оборудование семейства T-Мар может эффективно применяться для контроля качества в других сегментах микроэлектроники и в смежных отраслях, например, в производстве МЭМС и оптических компонентов.

В модельную линейку T-Мар входят системы, позволяющие работать с пластинами диаметром от 2 дюймов до 300 мм, минимальной толщиной отдельного слоя в стеке 3 мкм, минимальной полной толщиной пластины 5 мкм и максимальной – от 1 до 10 мм. Измерения выполняются с разрешением 0,1 мкм и точностью 0,5 мкм. Есть модели с ручной и автоматической загрузкой образцов.

Все системы семейства T-Мар имеют унифицированный, простой для использования интерфейс управления. Измеренные данные обладают высокой достоверностью, так как эффективный анализ формы сигнала позволяет исключать ошибочные результаты. Данные измерений отображаются в двух- и трехмерном графическом, а также в числовом виде. Система поддерживает протокол экспорта данных SECS/GEM.

В программном интерфейсе предусмотрены два режима работы: операторский (Operator mode) и инженерный (Engineering mode). Первый характеризуется максимальной простотой и быстротой работы – для комплексного измерения помещенного в машину образца достаточно четырех "кликов", второй обеспечивает необходимую разработчикам полупроводниковых приборов гибкость настроек.

Таким образом, рефлектометрия – это неразрушающий, неинвазивный и простой в использовании метод, который в случае тонких слоев требует модели для оценки физических параметров каждого слоя в стеке. Эффективность применения метода зависит от того, насколько точно численная модель описывает физическую реальность.

По всем вопросам, связанным с продукцией компании Fogale nanotech, можно обращаться по телефону +7 916 1147759. ●