

Владимир Сырякин | D_S_Zhdanov@mail.ru | Василий Юрченко | yur_med@mail.ru
Артем Осипов | avopiso@phys.tsu.ru | Михаил Куцов | mihail-kucov@mail.ru

Применение изображений 3D-томографии

для проектирования полупроводниковых приборов

Одной из главных проблем светодиодных осветительных приборов (ОП), определяющих долговечность и эффективность работы самих светодиодов, является проблема отвода тепла от корпуса в окружающее пространство [1–3]. Существующие инженерные методы расчета достаточно точны, но они дают усредненную картину по конструкции, то есть не способны сказать о локальном перегреве конструкции (тепловой режим отдельного светодиода или светодиодной матрицы может быть превышен).

При сложных конвективных потоках расчет усложняется и теряет точность. Для расчета конкретной конструкции по предлагаемой концепции было использовано приложение Flow Simulation CAD системы Solid Works. Flow Simulation позволяет рассчитывать тепло- и массообмен конструкции в газообразной и жидкой среде, при этом учитываются аэро- и гидродинамические свойства поверхностей конструкции. Результатом расчетов являются, например, распределение температуры в любом сечении конструкции и среды, скорости и формы потоков среды (воздуха), коэффициент теплопередачи от любой поверхности конструкции в среду. Возможности Flow Simulation позволяют за некоторое количество итераций оптимизировать тепловую конструкцию ОП. Изменяя форму поверхностей, зазоры и толщины, можно добиться компромиссного решения между массо-габаритными требованиями и тепловыми, не забывая при этом о реальности конструкции.

Реальные конструкции сложны не только внешне, они имеют также слоистую композиционную структуру, наделенную, к тому же,

технологическими и конструктивными дефектами. В этом случае очень полезно знание 3D томографических сечений всей конструкции с наноразрешением.

Колебания температурного режима работы светодиода могут приводить к проявлению дефектов крепления кристалла и токопроводящих контактов (рис. 1). Эти дефекты носят непостоянный характер и их достаточно трудно выявить методами проверки светодиодов на производстве [4].

Для решения этой задачи оптимальным является метод рентгеновской микро- и нанотомографии с последующим построением и анализом трехмерной модели образца. Для анализа полученных изображений и обнаружения дефектов используются методы градиентного, фрактального, вейвлет- и Фурье-анализа [6].

Исходными данными для метода градиентного анализа является массив значений плотностей в каждой точке образца, на основе которых определяется функция распределения плотности материала $\rho(x, y, z)$, после чего строится градиентное поле образца. Дефекты будут определяться неоднородностями этого поля, то есть наличием градиентов плотности:

$$\nabla\rho(x, y, z) = (\partial\rho/\partial x, \partial\rho/\partial y, \partial\rho/\partial z). \quad (1)$$

По объемному расположению этих градиентов можно определить размеры и характер дефектов.

К преимуществам данного метода относится возможность определить тип дефекта, его локализацию, а также геометрические и физические характеристики.

Градиент изображения $f(x, y)$ определяется в точке (x, y) как двумерный вектор:

$$G[f(x, y)] = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{df}{dx} \\ \frac{df}{dy} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Из векторного анализа известно, что вектор G указывает направление максимального изменения функции f в точке (x, y) . Однако при определении дефектов представляет интерес его модуль, называемый обычно градиентом и обозначаемый как $G[f(x, y)]$, где:

$$G[f(x, y)] = [G_x^2 + G_y^2]^{1/2} = [(\partial f/\partial x)^2 + (\partial f/\partial y)^2]^{1/2}. \quad (3)$$

На практике, как правило, градиент аппроксимируется абсолютными значениями:

$$G[f(x, y)] \cong |G_x| + |G_y|. \quad (4)$$

Эта аппроксимация значительно упрощает реализацию метода.

Вычисление градиента основано на нахождении первых производных $\partial f/\partial x$ и $\partial f/\partial y$. Для цифрового изображения это можно сделать несколькими путями. Один из подходов состоит в использовании разности между соседними точками:

$$G_x = \partial f/\partial x = f(x, y) - f(x-1, y), \quad (5)$$

$$G_y = \partial f/\partial y = f(x, y) - f(x, y-1), \quad (6)$$

Несколько более сложный способ включает точки в окрестности размерностью 3×3 с центром в точке (x, y) :

$$G_x = \partial f/\partial x = [f(x+1, y-1) + 2f(x+1, y) + f(x+1, y+1)] - [f(x-1, y-1) + 2f(x-1, y) + f(x-1, y+1)] = (g+2h+i) - (a+2b+c), \quad (7)$$

$$G_y = \partial f/\partial y = [f(x-1, y+1) + 2f(x, y+1) + f(x+1, y+1)] - [f(x-1, y-1) + 2f(x, y-1) + f(x+1, y-1)] = (c+2e+i) - (a+2d+g), \quad (8)$$

где буквы от a до i обозначают соседние точки центра (x, y) . Окрестность размерностью 3×3 точки (x, y) в упрощенной записи показана на рис. 2а. Отметим, что ближайшие к (x, y) точки в данном варианте определения производных цифрового изображения имеют значение, равное 2. Вычисление градиента в области размерностью 3×3 имеет преимущество по сравнению с использованием уравнений (7) и (8) в смысле большего усреднения, что делает градиент менее чувствительным к помехам. В принципе, возможно применение и более широких окрестностей для нахождения градиента.

-1	-2	-1	-1	0	1
0	0	0	-2	0	2
1	2	1	-1	0	1
а			б		

Рис. 2. Маски для вычисления: а) G_x ; б) G_y

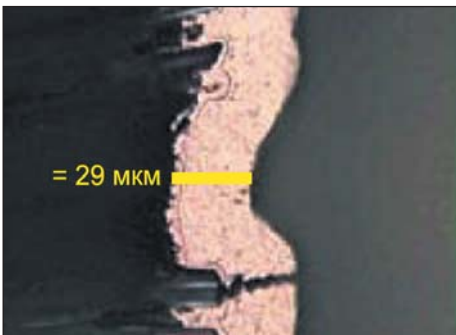


Рис. 1. Дефект контактной площадки

Значение G_x по уравнению (8) можно определить с помощью маски (рис. 2). Аналогично находится и значение G_y . Эти две маски обычно называются операторами Собеля. Использование данных масок в произвольной точке (x, y) сочетается в себе результат применения уравнений в виде аппроксимации градиента в этой точке. Перемещая маски по изображению $f(x, y)$, получают градиенты во всех его точках.

Процессы упругой деформации внутри деформируемого материала должны приводить к образованию на поверхности субструктуры, имеющей фрактальный характер. Подобный подход позволяет определять степень деформации с помощью численной характеристики, получаемой на основе анализа субструктуры, наблюдаемой на поверхности материала под нагрузкой, которая называется фрактальной размерностью (ФР).

При определении ФР методом серии изображений необходимо иметь серию изображений участка поверхности, снятых при различных увеличениях. Определение фрактальной размерности D производится по формулам:

$$L = L_0 \times \delta^{1-D}, \quad (9)$$

$$D = D' + 1, \quad (10)$$

где δ — масштаб изображения; L — длина профилей всех строк; L_0 — длина проекции профилей всех строк.

Формула (9) вытекает непосредственно из определения ФР (в данном случае в качестве фрактальной величины выступает длина профиля). На практике данный расчет осуществляется следующим образом.

Сначала для каждого изображения, полученного при коэффициенте увеличения δ , рассчитывается длина профиля каждой строки. Затем вычисляется общая длина всех строк изображения L и находится ее отношение к длине проекций этих строк L/L_0 .

После этого строится график зависимости L/L_0 от δ в логарифмическом масштабе. Затем на графике выбирается участок, отстоящий на 15% от максимального и минимального значений этой функции, и производится аппроксимация данного участка методом наименьших квадратов. Значение ФР будет определяться углом наклона данной кривой.

Основным недостатком данного метода является то, что для расчета необходимо иметь серию изображений участка поверхности (что в ряде случаев недопустимо). Это обстоятельство также сильно увеличивает время вычислений, так как приходится обсчитывать сразу несколько изображений.

Расчет значения ФР методом масштабной сетки основан на вычислении отношений длин профилей каждой строки (рассчитанных при разных масштабах) к их проекциям. Сначала определяется значение ФР для каждой из строк. Это происходит следующим образом: для каждого масштаба измерения r (раствора циркуля) рассчитывается отношение длины профиля строки к ее проекции L/L_0 . Затем определение значения ФР строки производится тем же способом, что и в предыдущем методе,

только здесь вместо L/L_0 всего кадра берется L/L_0 строки. Значение ФР всего изображения вычисляется путем усреднения значений ФР каждой из строк.

Развитие новых методов обработки изображений, основанных на использовании вейвлет-преобразования, определяется высоким потенциалом его математического аппарата и эффективностью алгоритмов обработки изображений в системах различного назначения. Последнее обусловлено возможностью проведения эффективной оценки свойств сигнала одновременно и в частотной, и во временной области. Главное отличие вейвлет-преобразования от преобразования Фурье заключается в более информативном представлении частотно-временных свойств сигналов. За способность вейвлет-анализа рассматривать сигнал в различных временных масштабах его часто называют математическим микроскопом. В настоящее время получили распространение два основных направления вейвлет-преобразования:

- непрерывный вейвлет-анализ, основными приложениями которого являются локализация и классификация особых точек сигнала, а также вычисление его различных характеристик и частотно-временной анализ;
- дискретный вейвлет-анализ, основной областью применения которого является сжатие видеoinформации, а также обработка изображений.

Результат вейвлет-преобразования при большой информативности характеризуется и большим объемом вычислений, а также, как правило, избыточностью представления результатов (по сравнению с Фурье-преобразованием). Это объясняется, прежде всего, тем, что вейвлет-преобразование позволяет вычислить относительный вклад частот в каждый момент времени (путем нахождения свертки с разномасштабными версиями вейвлета). Следовательно, производится наблюдение эволюции спектра, аналогичного Фурье, но не за выбранный период времени, а по всему временному интервалу. Таким образом, для информативного разложения исходного сигнала достаточно знать его вейвлет-преобразование на некоторой довольно редкой решетке в частотно-временной плоскости. Анализ литературных данных показывает, что даже качественные, высококонтрастные изображения, полученные с помощью различной информационно-измерительной техники (аппаратуры), несут в себе большое количество искажений различной природы, шумовых полей и др. Это мешает работе алгоритмов обработки изображений и требует дополнительных усилий для их подавления и устранения.

Вейвлет-спектр изображений также подвержен искажениям различного рода, связанным с шумовыми свойствами сигналов. Следует отметить, что понятие «помеха» связано с типом обработки изображения, и один и тот же эффект может по-разному интерпретироваться в различных задачах обработки изображений, таких как слежение, сжатие, текстурная обработка и т. п. В данной работе понятие «помеха» связано с факторами, препятствующими правильному детектированию полезного сигнала

(формированию деформационного рельефа на поверхности). Перечислим основные «мешающие» факторы:

- «белый шум» (связанный с преобразованием светового поля в электрический сигнал);
- искажения постоянной составляющей в сигнале (низкочастотный шум);
- высокочастотное заполнение (высокочастотный шум);
- текстурные помехи, не связанные со способом получения двумерного сигнала.

Основные (базовые) пути решения проблемы фильтрации помех:

- Для «белого шума» это прежде всего линейная фильтрация сигнала (например, фильтр линейного среднего) или нелинейный «медианный» фильтр.
- Для устранения искажений постоянной составляющей используются либо спектральные методы, либо приведение к нулю постоянной составляющей в ограниченном скользящем окне.
- Высокочастотные помехи устраняются также спектральными методами либо цифровыми фильтрами. [5]

У каждого из перечисленных методов имеются свои достоинства и недостатки. Соотнесем их с алгоритмами, основанными на вейвлет-преобразовании: ортогональное вейвлет-преобразование относится к спектральным методам, однако его основное преимущество перед преобразованием Фурье, как уже отмечалось выше, заключается в возможности локализации НЧ- и ВЧ-деталей, следовательно, для большинства задач можно синтезировать алгоритмы, осуществляющие за один подход решение задачи преобработки и обработки изображений.

*Работа выполнена при поддержке
Минобрнауки в рамках ФЦП РФ Г/К
№16.523.11.3009.*

Литература

1. Лукаш В. С., Юрченко В. И., Бакин Н. Н. Светотехнические изделия на основе полупроводниковых излучающих элементов. Программа Российской научной конференции «Субъекты Федерации в условиях реформ». Томск. 1994.
2. Николаев Д., Феопентов А. Основы теплового менеджмента при конструировании ПСП // Полупроводниковая светотехника. 2010. № 1.
3. Задорожный А. 3D-разработка теплоотводящих систем // Полупроводниковая светотехника. 2010. № 4.
4. Никифоров С. Почему светодиоды не работают так, как хотят их производители? // Компоненты и технологии. 2005. № 7.
5. Бубенчиков М. А., Газиева Е. Э., Гафуров А. О., Глушков Г. С., Жданов Д. С., Саньков Д. В., Сырякин В. И., Шидловский С. В., Юрченко А. В. Современные методы исследования материалов и нанотехнологий. Томск: Изд-во ТГУ. 2010.
6. Горелик С. С., Расторгуев Л. Н., Скаков Ю. А. Рентгенографический и электронооптический анализ. М.: Металлургия. 1970.