

Моделирование теплопереноса в тонких плёнках

Тукмаков К. Н., Архипов А. В.

Рассмотрено моделирование распределения температуры в тонкоплёночном проводнике под действием электрического тока. Полученная модель имеет динамический характер, то есть позволяет определить распределение температуры по поверхности проводника в любой момент времени на основе пошагового расчёта. Полученная модель позволяет учитывать собственное поле температур подложки. Модель оперирует локальными параметрами проводника, получаемыми в результате отдельного моделирования.

Введение

Проблема увеличения надёжности межсоединений в интегральных электронных приборах долго остаётся приоритетной задачей при повышении степени интеграции данных приборов. Это связано, во-первых, с уменьшением надёжности элементов коммутационной структуры, вызванным уменьшением их геометрических размеров и, следовательно, увеличением эксплуатационной нагрузки на эти элементы, и, во-вторых, с увеличением доли технологического брака, вызванным усложнением технологии. Технология производства микроэлектронных приборов постоянно развивается [1-5], что даёт возможность выполнять все элементы изделий на некотором уровне точности, который подбирают для обеспечения удовлетворительного, с точки зрения экономической целесообразности производства, уровня выхода годной продукции. С каждым годом максимальная точность выполнения элементов увеличивается, но сам факт выполнения топологии элементов изделия на заданном уровне не гарантирует его длительный срок службы, так как во время эксплуатации прибора на него действуют различные виды нагрузки [6-7]. В данной работе рассматривается нагрузка на коммутационную структуру со стороны протекающего по ней тока в условиях эксплуатационного диапазона температур. Протекающий в микропроводнике ток обуславливает действие двух механизмов его деградации: термический перегрев и электродиффузионную деградацию [8, 9]. Данная статья является одной из работ, посвящённых увеличению электродиффузионной надёжности коммутационной структуры. Процесс электропереноса [8] неразрывно связан с температурой объекта моделирования, поэтому решение задачи определения значения температуры в каждой точке среды является важным этапом моделирования электропереноса.

Постановка задачи

Как известно, протекающий ток вызывает нагрев проводника, мощность тепловыделения определяется сопротивлением проводника и силой тока. Если рассмотреть проводник интегральной микросхемы более детально, то, как и для массивного проводника, в нём можно выделить дефекты, неравномерности его геометрии и другие неоднородности. Эти факторы обуславливают неравномерность локальных значений как электрического сопротивления объёма микропроводника, так и неравномерности плотности тока, что, в свою очередь, вызывает неравномерность

тепловыделения в различных участках проводника [8]. Таким образом, двумерное поле распределения температур в плоскости проводника в общем случае неоднородно, картина поля определяется локальными параметрами проводника и приложенным к рассматриваемому участку напряжением. К этому следует добавить тот факт, что подложка в процессе эксплуатации нагревается не столько проводниками на ней, сколько активными элементами, расположенными на поверхности или в приповерхностном слое полупроводниковой подложки. Поэтому в установившемся режиме работы (при максимально возможном тепловыделении) подложка имеет свою картину распределения температур по её верхней поверхности [9, 10]. Ввиду того, что материал, на котором располагаются элементы коммутационной структуры (будь то слой оксида кремния в полупроводниковых приборах или диэлектрическая подложка в гибридной технологии), имеет относительно высокую теплопроводность, картина распределения температуры по подложке “сглаживается”. Но, тем не менее, ввиду наличия анизотропии теплопроводности и её конечности пренебречь собственным полем температур подложки нельзя. Таким образом, мы можем заключить, что температура на различных участках проводника может существенно различаться.

В работах [9-12] сделан вывод об определяющем значении температуры локальных участков проводника с током в процессе его электродиффузионной деградации в реальных условиях (условиях, когда данный проводник не уединён, а находится на подложке с другими элементами), необходимо в любой момент оценивать изменение температуры локальных участков моделируемого проводника. То есть существующую модель электродиффузионных процессов [12] необходимо уточнить рассмотрением задачи тепловыделения и теплопереноса в системе проводник-подложка.

Моделируемая система

Заметим, что моделирование поля температур будет достаточно производить на плоскости ввиду малой толщины плёнки и равномерности теплопроводности по толщине плёнки [12, 13]. Неравномерность распределения температуры по толщине может наблюдаться только в подложке, но с этой позиции нас интересует только транспорт тепла через подложку к теплоотводу и тепловое сопротивление плёнка-подложка.

Моделируемая система (рис. 1) представляет собой проводник, расположенный на подложке. Весь объём проводника и подложка под проводником разбиваются на элементарные объёмы, в пределах которых все параметры считаются постоянными (получаются две плоскости “кубиков”). В этой системе в рамках текущей задачи моделирования рассматриваются следующие процессы: тепловыделение в объёме проводника за счёт омического нагрева, теплопередача внутри проводника (только в плоскости моделирования) и теплопередача в подложку. При этом процесс распространения фононов в самой подложке рассмотрен не будет ввиду малой мощности тепловыделения проводника по сравнению с другими источниками, определяющими тепловое поле подложки. Подложка рассматривается как идеальный приёмник тепла, функция передачи тепла плёнка-подложка принимает во внимание лишь соответствующее тепловое сопротивление и локальную температуру подложки.

Другие направления теплопереноса, которые могут иметь место в реальном электронном приборе, в данной работе не рассматриваются. Задача, в которой проводник окружён какой-либо теплопроводящей средой (пассивированный проводник,

элемент многослойной или многоуровневой коммутационной структуры), в данной модели не рассматривается, так как данный случай не рассматривается и в самой модели электропереноса [12].

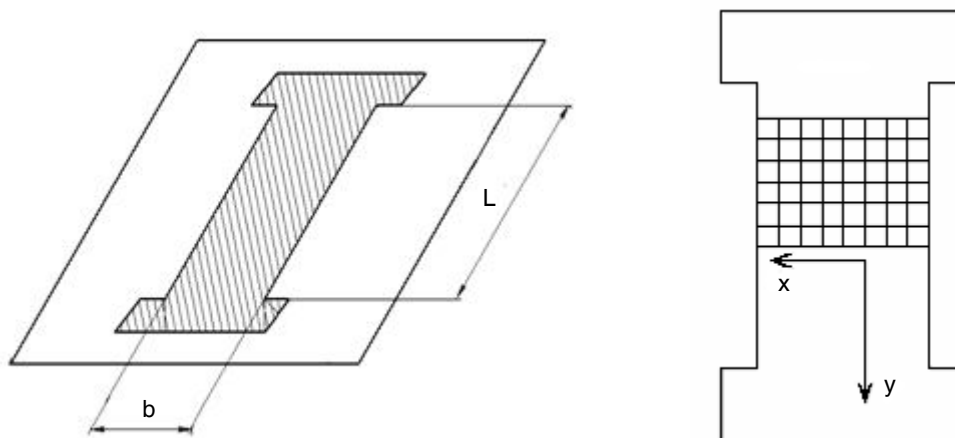


Рис. 1.

Моделируемая система: участок тонкоплёночного проводника на подложке

Решение задачи теплового баланса

В общем случае для решения задачи нахождения распределения температуры решается дифференциальное уравнение теплопроводности вида [13, 14]:

$$\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q_v - w_s = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

где: λ_x и λ_y - коэффициент теплопроводности; q_v - объёмная плотность теплового потока источника тепла в плёнке; w_s - объёмная плотность теплового потока в приёмник тепла; ρ - плотность материала проводника; c_p - удельная теплоёмкость при постоянном давлении.

Нестационарное уравнение (1) описывает двумерное поле температуры, его решение позволяет получить функцию зависимости температуры от времени и координаты. Рассмотрим более подробно члены данного уравнения. В данном случае теплопроводность плёнки неоднородна (зависит от координаты) и меняется во времени, её значение определяется и температурой, и другими процессами, происходящими в моделируемой системе на другом уровне.

Источником тепловыделения является омический нагрев проводника под действием тока:

$$q_v = i^2 \rho_i \quad (2)$$

где: i - плотность тока; ρ_i - удельное сопротивление.

Поток тепла в подложку (теплоотвод) определяется следующим выражением [13]:

$$w_s = \frac{\lambda_s}{d_{eff}} (T(x, y, t) - T_0(x, y)) \quad (3)$$

где: λ_s - теплопроводность подложки (считается изотропной и не зависящей от температуры); $T_0(x,y)$ - температура подложки; d_{eff} - эффективная толщина подложки.

Последняя величина определяет эффективную толщину полубесконечного приёмника тепла, которым в рассматриваемой системе можно считать подложку (толщина плёнки на несколько порядков меньше толщины подложки) [13]:

$$d_{\text{eff}} \cong \frac{b}{\pi} \ln \frac{2h}{b} \quad (4)$$

где: b - ширина плёнки; h - толщина подложки.

Запишем формальный вид данного уравнения применительно к нашей задаче, подставив в (1) выражения (2) - (4)]:

$$\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + i^2 \rho_i - \frac{\pi \lambda_s (T - T_0)}{b \cdot \ln(2h/b)} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

$$T(\pm\infty) = T_0(\pm\infty)$$

В формуле (5) параметры функций (x, y, t) опущены для упрощения читаемости записи, но они подразумеваются для каждой переменной за исключением λ_s , а $T_0(x, y)$ постоянна во времени.

Точного решения данного дифференциального уравнения не существует ввиду отсутствия явной временной зависимости входящих в него переменных (реальные значения параметров вычисляются на каждом шаге моделирования с помощью отдельного моделирования). Поэтому полученное уравнение необходимо решать численными методами вместе с остальными этапами численного моделирования. Для этого можно применить метод конечных разностей. В результате преобразований получим следующее выражение для определения текущего значения температуры участка плёнки на заданном шаге моделирования (используется итерационный метод решения):

$$T_{i+1} = \frac{\Delta t}{\rho c_p} \left(\lambda_x \frac{T_{i-1}^{(x)} - 2T_i^{(x)} + T_{i+1}^{(x)}}{\Delta x^2} + \lambda_y \frac{T_{i-1}^{(y)} - 2T_i^{(y)} + T_{i+1}^{(y)}}{\Delta y^2} + i^2 \rho_i - \frac{\pi \lambda_s (T_i - T_{0i})}{b \cdot \ln(2h/b)} \right) + T_i \quad (6)$$

где индексы (x) относятся к элементам проводника, расположенным в строках, а индексы (y) - в столбцах, как показано на рис. 1.

Полученное выражение (6) можно использовать для пошагового вычисления температуры заданной ячейки проводника на основании данных о его параметрах и параметрах окружающих его ячеек. Точность моделирования определяется временным шагом Δt и координатными шагами (размером ячеек) Δx и Δy . Выбор конкретных значений Δt может изменяться во время моделирования с целью отыскания компромиссного значения для обеспечения заданного уровня точности моделирования и уменьшения временных затрат на моделирование.

Примеры результатов моделирования приведены на рис. 2, где изображена диаграмма поля температур в пространстве для различных условий моделирования. При моделировании использовались следующие параметры системы: размеры поля моделирования 100x100 клеток; $\lambda_x \approx \lambda_y = 237$ Вт/(м·К); $q_v \approx 6,5 \cdot 10^4$ Вт/м³; $\rho = 2,6989$ г/см³; $c_p = 25,093$ Дж/(К·Моль); $b = 2$ мкм; $h = 0,5$ мм; время моделирования

примерно 30 секунд (не установившиеся режимы); точность расчёта 0,1 °К. В вариантах а) - в) источники тепла расположены на прямолинейных отрезках, в варианте г) точечные источники произвольной мощности расположены случайным образом. На рисунке 2а изображён вариант, где присутствует анизотропия в теплопроводности плёнки, при этом наблюдается неравномерность (хотя мощность всех источников одинакова). В варианте б) мощность источников линейно возрастает. В варианте в) присутствуют неравномерное поле температур подложки и два линейных источника мощности.

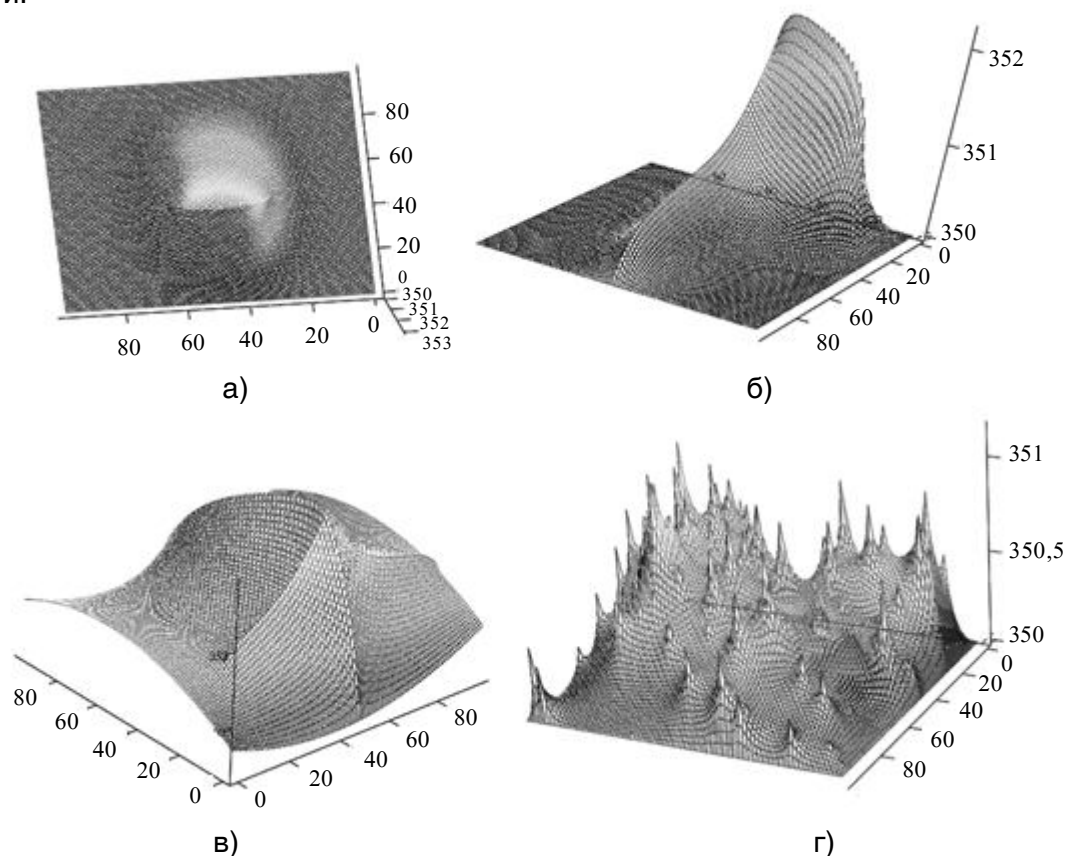


Рис. 2.

Пример результатов моделирования

Заключение

Приведённые результаты моделирования подтверждают адекватность полученной модели теплопереноса в тонких плёнках. Полученная модель обладает высокой универсальностью и легко реализуется в виде программы на ЭВМ. Также она легко совмещается с существующей моделью электропереноса, выполненной на схожих принципах.

Литература

1. <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/7707.html>
2. <http://www.terralab.ru/system/36183/mail.html>
3. Ю. П. Снитовский, В. В. Нелаев, В. А. Ефремов. Новая технология изготовления мощного биполярного СВЧ транзистора. - Микроэлектроника, 2007, т. 36, № 6, с. 465-471.

-
4. Hei Wong. *Recent developments in silicon optoelectronic devices* // *Microelectronics Reliability*. vol 42, issue 3, 2002, pp. 317-326.
 5. Ржанов А. В., Свиташев К. К. *Полупроводниковая микроэлектроника и технический прогресс*. - *Микроэлектроника*, 1982, т. 11, вып. 6, с. 366-380.
 6. Суханов А. А. *Проблемы межсоединений в современной микроэлектронике*. - *Микроэлектроника*, 1984, т. 13, вып. 3, с. 179-195.
 7. Борзов В. М. и др. *Влияние технологии металлизации СБИС на её стойкость к электромиграции*. - *Вакуумная техника и технология*, 1992, т. 2, с. 27-30.
 8. Колешко В. М., Белицкий В. Ф. *Массоперенос в тонких плёнках*. – М.: Наука и техника, 1980.
 9. Christou, Aris. *Elektromigration and Electronic Device Degradation*. John Wiley & Sons, 1994.
 10. K.N. Tu: *Recent advances on electromigration in very-large-scale-integration of interconnects*. *Journal of applied physics*, vol. 94, 9, 2003.
 11. Архипов А. В., Баканов Г. Ф. *Сравнительная оценка надёжности системы металлизации интегральных схем на основе монокристаллических плёнок* / *Изв. ЛЭТИ: Сб. науч. тр. // Ленингр. электротехн. ин - т*. - Л., 1992, вып. 448, с. 25.
 12. Архипов А. В., Тукмаков К. Н. *Электродиффузионная надёжность тонкоплёночной металлизации на основе поликристаллических плёнок*. // *Сборник трудов международного симпозиума «Надёжность и качество 2007»*. - Пенза: ПГУ, 2006.
 13. Дульнев Г. Н. *Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре* // *Учебник для вузов по спец. «Конструир. и произв. радиоаппаратуры»*. – М.: Высшая школа, 1984, 247 с.
 14. Русин С. П., Пелецкий В. Э. *Тепловое излучение полостей*. – М.: Энергоатомиздат, 1987.