

УДК 621.01

А.Т. БОГОРОШ

*Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев, Украина***ДИАГНОСТИКА РАЗРУШЕНИЯ ОБЪЕКТОВ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ**

Изучен процесс разрушения (появления и роста микротрещин и других дефектов) металлических частей микро- и нанoeлектроники и их проводников от внешних воздействий.

диагностика, объекты микро- и нанoeлектроники

Современное машиностроение, а там более авиастроение, не обходится без применения микро- и нанoeлектроники (далее – МН), входящей в многофункциональные датчики и навигационные приборы. Объекты МН в процессе эксплуатации испытывают большие механические (вибрация), физические (переменные значения температуры и давления), химические (состав сред) и другие виды нагрузок.

В предыдущих исследованиях по миграции атомных кластеров под действием волновых эффектов с помощью внешнего физического поля (электроосаждение в магнитном поле, цветная пигментная окраска оптических стекол коллоидными частицами металлов, матричное поглощение наночастиц керамическими материалами для защиты от радиоволн, получение сверхпрочных – около 24,5 ГПа – углеродных нитеобразных кристаллов в виде усов и иголок для композитов аэрокосмического применения, получение моно- и поличастиц на основе Fe, C, Ca, Mg, Sr, P₂O₅ и других элементов размером от 10 до 30 нм для изготовления суспензий для моторных присадок, синтеза игольчатых кристаллов для саморазрушения отложений и создания тепловой и звуковой изоляции для аэрокосмической техники) были выявлены побочные эффекты, разрушающие поли- и монокристаллические материалы, а также металлические подложки, на которых они закреплены. Известны также работы других авторов по исследованию напряжений, возникающих в платах микромодулей, при изменении атмосферного давления [1].

Целью данной работы является изучение процессов разрушения (появление и рост микротрещин и других дефектов) металлических частей МН и их проводников от внешних воздействий. Такие дефекты, как правило, контролируются приборами, содержащими ферромодедуляционные чувствительные элементы (далее – ФМЧЭ).

В рамках выполнения украинско-российской программы «Нанофизика и нанoeлектроника» (2001-2006 гг.) учеными двух стран получены оригинальные результаты, не имеющие аналогов в мировой практике, в т.ч. в гетероструктурах – основы объектов МН – выявлены квантовые проводники, трансмиссия электронов через линейную молекулу, делокализованные и локализованные электронные состояния при формировании тока, органические молекулярные структуры и композиции для МН, оптоэлектроники и сенсорики и др. [2, 3]. Однако, надежность работы таких объектов МН обеспечивает механическая прочность их отдельных элементов [4].

При этом проведение не разрушающего контроля объектов МН и разработка приборов для их реализации на базе ФМЧЭ требует знания изменения свойств от внешних физико-химических воздействий проводников, материалов гетероструктур и подложек, на которых они синтезированы. Необходима также новая концепция повышения точности измерений дефектов с помощью магнитных полей, а также решения математических моделей для прогнозирования разрушения объектов МН.

Известно, что в реальных условиях водород является основным элементом, влияющим на металлические составляющие материалов МН, а, следовательно, на их магнитные свойства МН, диагностируемые ФМЧЭ. В силу сверх активной подвижности водорода, проникающего в узлы кристаллических решеток материала, он вытесняет углерод, а от внешних волновых эффектов возникают локальные кристаллические и структурные неоднородности, активизируется миграция атомных кластеров, переориентация квантов и т.п. [5], что и приводит к хрупкости и образованию трещин в конструкциях МН. В результате в локальных точках материала возникают и растут напряжения, разрушающие и снижающие надежность и долговечность изделий МН. Без отсутствия защитных покрытий этот процесс идет беспрерывно до полного разрушения металлических частей МН [6].

Для многих процессов, в том числе и водородного разрушения МН, наибольшее влияние имеют перепады давления и температуры. Нестационарные процессы усиливают свою активность при волновых знакопеременных внешних воздействиях. Поэтому объекты МН под действием знакопеременных значений температуры и давления, усиливающих движущую силу процесса разрушения, быстрее выходят из строя. Физико-химическая информация об этих процессах накапливается и архивируется в продуктах разрушения (коррозии, отложениях, налетах, цветах побежалости и др.) [7], что позволяет восстановить картину процесса разрушения МН, в том числе коррозию. Исследования таких многофакторных процессов в МН очень трудоемки, дорогостоящи, длительны, требуют навыков и специальных технологий приготовления радиальных шлифов для изучения топографии дефектов на сканирующих и растровых микроскопах. Для выявления карт закономерного распределения химических элементов на плоскости шлифов использовали рентгеновские дифрактометры, счетчики вторичной эмиссии, камеры Гондольфи и др.

Микроисследования топографии сечений проводников МН толщиной около 0,1 мм показали многообразие форм дефектов, образующихся в металле под воздействием коррозии, механических и других физико-химических факторов, которые можно сгруппировать на четыре основных вида.

Первый вид. Начальный этап развития коррозии связан с образованием множества нанотрещин по границах зерен (рис. 1), через которые атомарный водород проникает в глубину металла. В местах с природными структурными аномалиями металла он накапливается, что приводит к расширению нанотрещин (рис. 2).

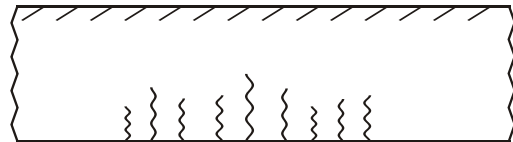


Рис. 1. Начальный этап развития дефекта – нанотрещин по всей внутренней поверхности объекта

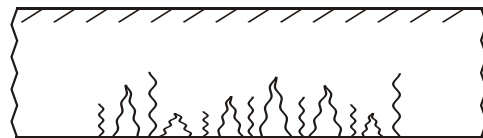


Рис. 2. Расширение трещин из-за несовершенства кристаллических решеток металла объекта

Второй вид. Под воздействием давления водорода внутри трещины объекта МН и давления (в том числе избыточного) атмосферы/среды, разрозненные дефекты сливаются (рис. 3) и образуют внутренние полости глубиной до 100 нм. Они открывают доступ водорода и другой агрессивной среды к "свежему металлу", что приводит к продолжению процесса разрушения, причем наибольшая интенсивность развития дефектов наблюдается в вершине каждой полости, что позволяет заменить форму развивающегося дефекта прямоугольной ступенькой (рис. 4).

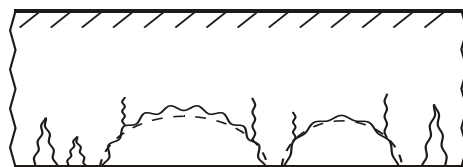


Рис. 3. Сливание нанотрещин в локальные полости

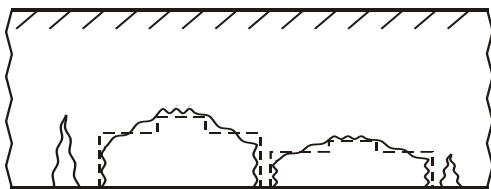


Рис. 4. Образование полостей в виде прямоугольной ступеньки

Третий вид. Так как развитие дефекта наиболее интенсивно идет в направлении, перпендикулярном внутренней поверхности стенки, в силу действия когезионных сил, то вскоре развивающийся дефект приобретает конусную форму (рис. 5).

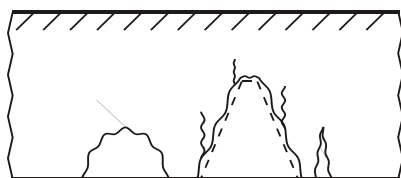


Рис. 5. Последующее развитие дефекта водородной коррозии, приближающегося к конической форме

По мере приближения дефекта к внешней стенке проводника МН увеличивается разрушающее действие от разницы давлений среды из-за рассогласования механических напряжений на защищенной и открытой поверхностях, где зародилась дефектная трещина. В результате дефект все больше приближается к прямоугольной форме (рис. 6).

Значительное увеличение размера дефекта приводит к тому, что его зубчатая поверхность в виде нанотрещин или перестает влиять на формирование поля рассеивания дефекта, или переходит в четвертый (наклонный) тип.

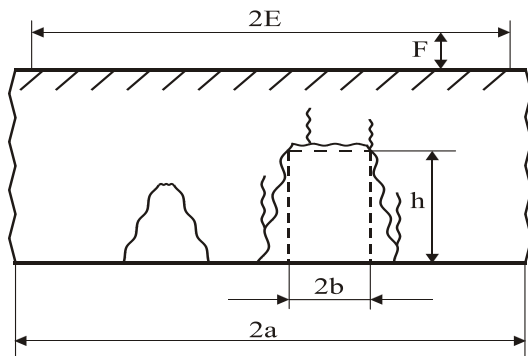


Рис. 6. Расчетная модель подповерхностного дефекта водородной коррозии

Четвертый вид. При более интенсивном разрушении прямоугольный дефект может перерасти в параллелограмм с прямыми или зубчатыми плоскостями малых сторон и параллельными плоскостями больших сторон. Схемы сечений таких дефектов наклонной (рис. 7) и зубчатой (рис. 8) формы позволяют сравнивать результаты, полученные другими авторами.

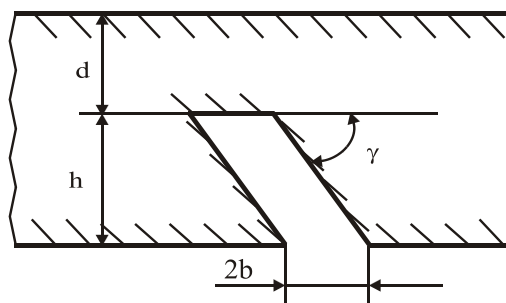


Рис. 7. Схема сечения наклонного дефекта

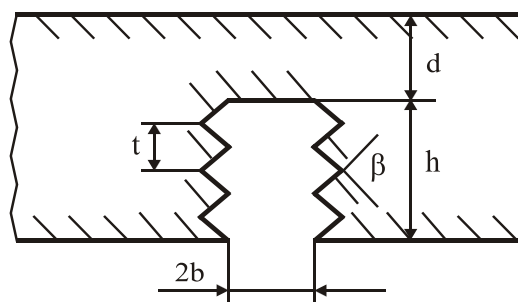


Рис. 8. Схема сечения зубчатого дефекта

Для математической формализации внешних и внутренних дефектов можно пользоваться геометрической моделью образца с дефектом на глубине d (рис. 9) или высотой h (рис. 10). Из рассмотренных типов дефектов для расчетов такое сечение прямоугольной формы подобно дефекту, приведенному на рис. 6.

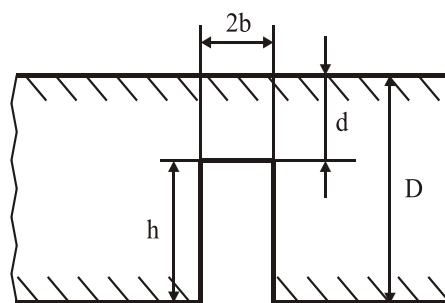


Рис. 9. Геометрическая модель подповерхностного дефекта

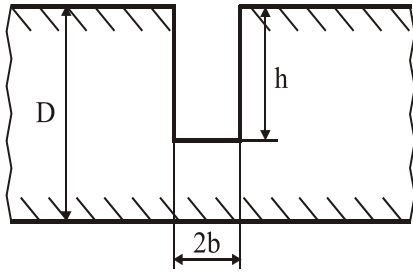


Рис. 10. Геометрическая модель поверхностного дефекта

Для диагностики микротрещин МН с помощью катушек подмагничивания и обеспечения необходимого порога чувствительности ФМЧЭ использованы методика выбора оптимального значения поля феррозонда и подходы работ [8 – 10], имеющие следующие отличия. Так, для того, чтобы создать однородное магнитное поле, вектор напряженности которого в области V_M во всех точках $Q \in V_M$, катушки подмагничивания имели по шесть секций (вместо трех) и с разным значением тока в каждой из них (рис. 11).

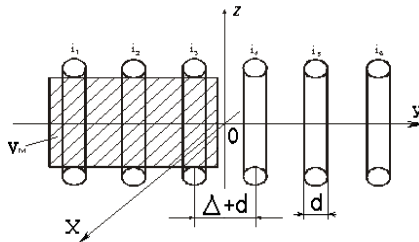


Рис. 11. Замена трех секций на шесть в катушке с бесконечно тонкими проводниками

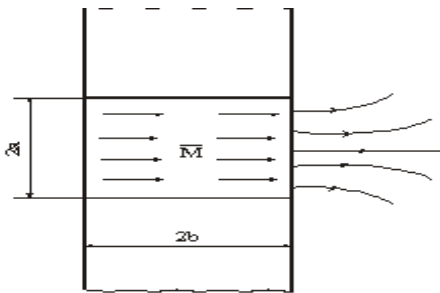


Рис. 12. Схема магнитного потока в V_M из шести секций вдоль оси

Таким образом, в объеме V_M с размерами вдоль осей x, y, z соответственно $2a, 2b, 2c$ (рис. 12), а в сечении, имеющем форму прямоугольника в нашем случае, создается однородное и направленное вдоль оси y поле магнитостатики $\bar{B}(x, y, z)$.

В отличие от работ [10, 11] для получения шести секционных катушек был использован виртуальный метод зеркального отражения, что на три порядка повысило чувствительность ФМЧЭ. Многократное увеличение чувствительности измерительных элементов ФМЧЭ при построении детерминированной шаговой математической модели используется как совокупность N бесконечно тонких электромагнитных катушек с витками прямоугольной формы, лежащими в плоскости сечений, параллельных осям xOz (рис. 11). Толщины секций катушек и зазоры между ними обозначены соответственно через $d_j (j = \overline{1, N})$, причем $d_j > 0; D_j \geq 0$.

На рис. 11 изображен случай при одинаковых d_j и D_j , т.е. когда все тонкие катушки изготовлены из провода одного сечения. Тогда искомым будет число витков тонких катушек $W_1, W_2, \dots, W_N$. Другое отличие в том, что сначала определяются токи $i^{(1)}_1, i^{(1)}_2, \dots, i^{(1)}_N$ бесконечно тонких прямоугольных витков, размеры которых вдоль осей x и z равняются внутренним размерам проектирования тонких катушек. Очевидно, что

$$y_j = -b + \frac{d}{2} + (d + \Delta)(j - 1); j = \overline{1, N}. \quad (1)$$

Далее по формулам Био-Савара-Лапласа можно пошагово найти индукцию единичного тока j -го витка в объеме V_M , которая равна

$$\begin{aligned} \bar{B}_j^{(1)}(x, y, z) = & \frac{\mu_0}{4\pi} \times \\ & \times \left[\frac{Y_j}{x_{j-}^{(1)2} + Y_j^2} \left(\frac{z_{j+}^{(1)}}{r_{3j}^{(1)}} - \frac{z_{j-}^{(1)}}{r_{2j}^{(1)}} \right) - \frac{Y_j}{x_{j+}^{(1)2} + Y_j^2} \left(\frac{z_{j+}^{(1)}}{r_{4j}^{(1)}} - \frac{z_{j-}^{(1)}}{r_{1j}^{(1)}} \right) \right] \bar{1}_\alpha + \\ & + \left[\frac{z_{j-}^{(1)}}{Y_j^2 + z_{j-}^{(1)2}} \times \left(\frac{x_{j-}^{(1)}}{r_{2j}^{(1)}} - \frac{x_{j+}^{(1)}}{r_{1j}^{(1)}} \right) + \frac{x_{j-}^{(1)}}{x_{j-}^{(1)2} + Y_j^2} \left(\frac{z_{j-}^{(1)}}{r_{2j}^{(1)}} - \frac{z_{j-}^{(1)}}{r_{3j}^{(1)}} \right) + \right. \\ & + \left. \frac{z_{j+}^{(1)}}{Y_j^2 + z_{j+}^{(1)2}} \left(\frac{x_{j+}^{(1)}}{r_{4j}^{(1)}} - \frac{x_{j-}^{(1)}}{r_{2j}^{(1)}} \right) + \frac{x_{j+}^{(1)}}{x_{j+}^{(1)2} + Y_j^2} \times \left(\frac{z_{j+}^{(1)}}{r_{4j}^{(1)}} - \frac{z_{j+}^{(1)}}{r_{1j}^{(1)}} \right) \right] + \\ & + \left[\frac{Y_j}{Y_j^2 + z_{j-}^{(1)2}} \left(\frac{x_{j+}^{(1)}}{r_{1j}^{(1)}} - \frac{x_{j-}^{(1)}}{r_{2j}^{(1)}} \right) + \frac{Y_j}{Y_j^2 + z_{j+}^{(1)2}} \left(\frac{x_{j-}^{(1)}}{r_{3j}^{(1)}} - \frac{x_{j+}^{(1)}}{r_{4j}^{(1)}} \right) \right] \bar{1}_z. \end{aligned}$$

Здесь $x + a_j^{(1)} = x_{j+}^{(1)}$, $x - a_j^{(1)} = x_{j-}^{(1)}$, $y - y_j = Y_j$;
 $z + c_j^{(1)} = z_{j+}^{(1)}$, $z - c_j^{(1)} = z_{j-}^{(1)}$;

$$\begin{aligned} r_{1j}^{(1)} &= \sqrt{x_{j+}^{(1)2} + Y_j^2 + z_{j-}^{(1)2}}; \\ r_{2j}^{(1)} &= \sqrt{x_{j-}^{(1)2} + Y_j^2 + z_{j-}^{(1)2}}; \\ r_{3j}^{(1)} &= \sqrt{x_{j-}^{(1)2} + Y_j^2 + z_{j+}^{(1)2}}; \\ r_{4j}^{(1)} &= \sqrt{x_{j+}^{(1)2} + Y_j^2 + z_{j+}^{(1)2}}. \end{aligned} \quad (2)$$

В формулах (2) и далее через x, y, z обозначено точками наблюдение поля в объеме V_m . Точки $i_j^{(1)} (j = \overline{1, w})$ находятся при условии

$$\left\| \bar{B}(x, y, z) - \sum_{j=1}^N i_j^{(1)} B_j^{(1)}(x, y, z) \right\| = \min. \quad (3)$$

Решение задачи (3) сводится к известной системе линейных алгебраических уравнений

$$\sum_{j=1}^N (\bar{B}_j^{(1)}, \bar{B}_k^{(1)}) i_j^{(1)} = (\bar{B}, \bar{B}_k^{(1)}), \quad k = \overline{1, w}. \quad (4)$$

Тогда решением системы (4) будет совокупность микротоков $i_1^{(1)}, i_2^{(1)} \dots i_N^{(1)}$. После этого можно найти магнитное поле этих микротоков $B_N^{(1)2}(x, y, z)$, а также погрешность $\eta_N^{(1)} = \left\| \bar{B} - \bar{B}_N^{(1)} \right\| / \left\| \bar{B} \right\|$.

Система линейных уравнений образуется из определения скалярного произведения в Гильбертовом пространстве

$$(\bar{v}, \bar{u}) = \int_{V_m} \bar{v}(x, y, z) \bar{u}(x, y, z) dV. \quad (5)$$

Далее по найденным значениям токов определяется первое приближение совокупности тонких катушек, т.е. найденные токи распределяются по сечениям тонких катушек с учетом коэффициентов заполнения. В итоге находятся размеры катушек в первом приближении, т.е. $h_1^{(1)}, h_2^{(1)} \dots h_N^{(1)}$

Направления плотности тока в тонких катушках (для первого приближения) определяются знаками токов $i_j^{(1)}$. Если $i_j^{(1)} > 0$, то плотность тока в верхнем

пересечении j -й тонкой катушки направлена вдоль оси x , если же $i_j^{(1)} < 0$, то против оси x . Получив параметры первого приближения совокупности тонких катушек, находим поле в объеме V_c , создаваемое этими катушками $B^{(1)}(x, y, z)$ по формулам (5), и погрешность $\eta^{(1)} = \left\| \bar{B} - \bar{B}^{(1)} \right\| / \left\| \bar{B} \right\|$.

Если эта погрешность превышает погрешность $\eta_N^{(1)}$, то необходимо выполнить второе приближение, располагая бесконечно тонкие прямоугольные витки сверху тонких катушек первого приближения, а затем распределяя найденные в них токи по сечениям тонких катушек.

Размер $h_j^{(1)}$ увеличивается, если токи $i_j^{(1)}$ и $i_j^{(2)}$ одного знака, и уменьшаются в противном случае. Сечение тонких катушек выбирается из допустимого относительного нагревания плотности тока. Итерационный процесс прекращается после n -го шага, когда наступает приближенное равенство $\eta^{(n)} = \eta_N^{(n)}$.

В рассмотренном случае толщина объекта соответствует величине $2b_m$, а объем — $V_m = 2a_m \cdot 2c_m \cdot 2b_m$. В шести точках (рис. 13) задается одна составляющая индукции магнитного поля $\bar{B} = \overline{1_y} B_0$, тогда система уравнений запишется так

$$\begin{bmatrix} B_{1y}^{(1)} \cdot B_{1y}^{(1)} & B_{2y}^{(1)} \cdot B_{1y}^{(1)} & B_{3y}^{(1)} \cdot B_{1y}^{(1)} & B_{4y}^{(1)} \cdot B_{1y}^{(1)} & B_{5y}^{(1)} \cdot B_{1y}^{(1)} & B_{6y}^{(1)} \cdot B_{1y}^{(1)} \\ B_{1y}^{(1)} \cdot B_{2y}^{(1)} & B_{2y}^{(1)} \cdot B_{2y}^{(1)} & B_{3y}^{(1)} \cdot B_{2y}^{(1)} & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ B_{1y}^{(1)} \cdot B_{6y}^{(1)} & B_{2y}^{(1)} \cdot B_{6y}^{(1)} & B_{3y}^{(1)} \cdot B_{6y}^{(1)} & B_{4y}^{(1)} \cdot B_{6y}^{(1)} & B_{5y}^{(1)} \cdot B_{6y}^{(1)} & B_{6y}^{(1)} \cdot B_{6y}^{(1)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ i_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{1y} \cdot B_0 \\ B_{2y} \cdot B_0 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ B_{6y} \cdot B_0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

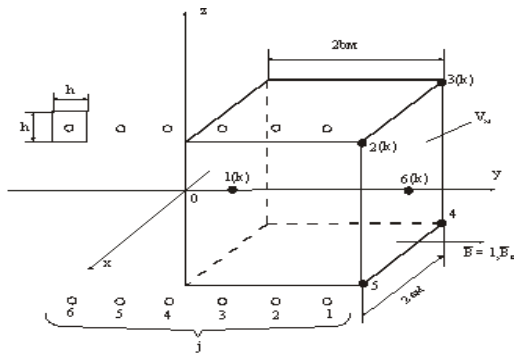
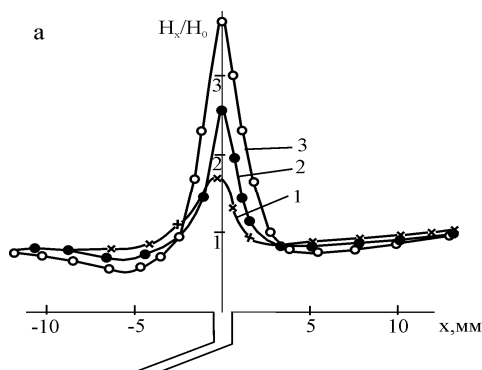
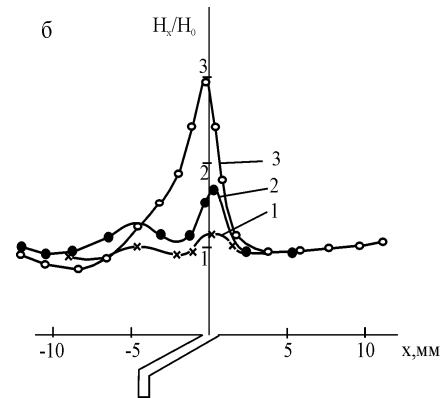
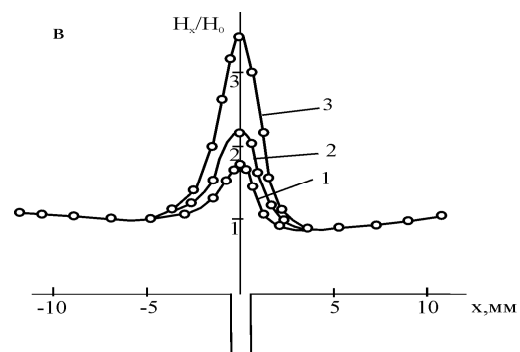
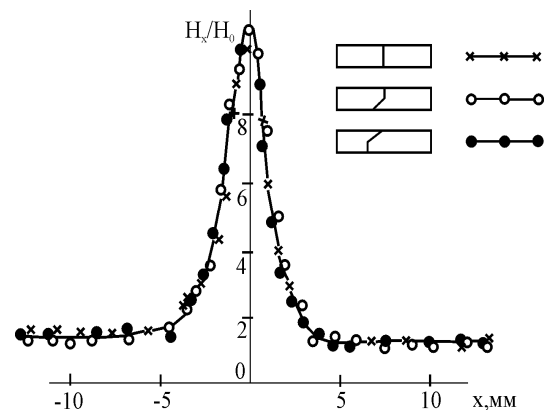


Рис. 13. К составлению системы линейных уравнений

По предложенной методике был приведен расчет систем катушек намагничивания со следующими параметрами: $h = 0,25$ мм; $a = b = 0,01$ мм. В объеме $0,25 \cdot 0,1 \cdot 0,1$ мм³ синтезировалось однородное магнитное поле с вектором индукции $B = 0,1$ Тл. В результате получены следующие значения токов: $i_1 = 3,0 \cdot 10^3$ А; $i_2 = 4,4 \cdot 10^3$ А; $i_3 = 5,3 \cdot 10^3$ А. Погрешность расчета не превышает $\eta = 5,7\%$.

В процессе коррозии встречались также трещины и сформированные дефекты, имеющие сложный профиль поперечного сечения, которые были не только наклонены своей поверхностью к подложке, но и многократно меняли свой угол наклона в процессе развития дефекта внутри материала. Поэтому вместо моделирования изучали поля дефектов при полях с максимальной магнитной проницаемостью, в том числе трещин со смещенными гранями, выявленных после пайки, сварки, диффузионного склеивания шва. В результате обнаружена аналогия топографий полей прямоугольных дефектов. Данные приедены на рис. 14 – 17.

Рис. 14. Топография поля дефекта ($h = 4$ нм; для $1 - 2b = 0,025$; $2 - 2b = 0,08$; $3 - 2b = 0,2$ нм) при напряженности поля на поверхности МН $H = 170$ А/смРис. 15. Топография поля дефекта ($h = 4$ нм; для $1 - 2b = 0,025$; $2 - 2b = 0,08$; $3 - 2b = 0,2$ нм) при напряженности поля на поверхности МН $H = 170$ А/смРис. 16. Топография поля дефекта ($h = 4$ нм; для $1 - 2b = 0,025$; $2 - 2b = 0,08$; $3 - 2b = 0,2$ нм) при напряженности поля на поверхности МН: $H = 10$ А/смРис. 17. Зависимость $H_x(x)$ для трех видов дефектов ($h = 4$; $2b = 0,2$ нм) в магнитном поле $y = 1,0$ нм, $H = 10$ А/см

Выводы

Поскольку процесс коррозии без специальных покрытий прервать невозможно, то для гарантии безопасной эксплуатации нанoeлектронных устройств за ними необходимо следить и контролиро-

вать степень повреждения МН. Для этой цели возможно использовать разработанные в рамках украинско-российского проекта устройства и методы магнитостатики с применением матриц ФМЧЭ.

Диагностику разрушения объектов МН можно также производить, используя математическую модель с последующим решением соответствующих задач и переходом от известных дифференциальных уравнений электромагнитного поля к интегральному виду, базирующихся на тождествах Грина. Такая модель помогает не только предсказывать появление микротрещины, но направление их развития в процессе эксплуатации приборов с элементами МН. Недостатком такой модели является то, что расчет физических полей в общей постановке задачи больше применим к объектам с большой металлической массой и толщиной подложек.

Поэтому для выявления микротрещин, дефектов и другой диагностики на объектах МН площадью от $1 - 2 \text{ мм}^2$ при толщине слоя от 0,2 до 10 нм требуется другая концепция моделирования для прогнозирования процессов разрушения МН и более высокая чувствительность специально созданных приборов.

Метод интегральных уравнений, как частный случай шаговой детерминированной модели, позволяет оптимизировать магнитное поле, используя данные разных источников, так как он основан на теории нахождения потенциала поверхностных или объемно распределенных источников физического поля. Характерным для этого метода есть существование большого многообразия форм, которые отличаются способами записи и решения интегральных уравнений.

Литература

1. Ройзман В.П., Стрельбицкий В.В. Экспериментальное исследование напряжений, возникающих в платах микромодулей, при изменении атмосферного давления // Вісник Хмельницького університету. – 2006. – №1. – С. 206-207.
2. Исследование электрофизических и люминесцентных свойств металл-органических нанокомпози-

тов / Л.В. Видута, О.Э. Кияев, А.А. Марченко и др. // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. – 2005. – Т. 3, № 3. – С.1001-1010.

3. Петров Э.Г. Трансмиссия электронов через линейную молекулу: роль делокализованных и локализованных электронных состояний в формировании тока // Физика низких температур. – 2005. – Т. 31, № 3/4. – С. 445-462.

4. Богорош О.Т., Стеблянюк П.О. Моделювання магнітного контролю гетероструктур // Математичні проблеми технічної механіки: Мат. міжн. конф. – Дніпропетровськ, Дніпродзержинськ, 2006. – С. 81-82.

5. Богорош А.Т. Управление формированием приповерхностного слоя растущего монокристалла при ионной имплантации примесей // ДНАУ. – 1999. – № 1. – С.70-81; № 2. – С. 80-91.

6. Шпилевский Э.М., Богорош А.Т., Литвин П.М. Формирование тонких пленок фуллерита при конденсации // Тезисы докладов Межд. конф. к 40-летию Института физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси. – Минск: БГУ, 2003. – С. 209.

7. Богорош А.Т. Фізико-хімічна інформатика: народження нового наукового напрямку // Вісник НАН України. – 1999. – № 10. – С. 15-19.

8. Тозони О.В., Романович С.С. О расчете постоянных магнитов на ЭЦВМ // Электромеханика. – 1975. – № 8. – С. 818-826.

9. Демирчян К.С., Чечурин В.Л. Машинные расчеты электромагнитных полей: Уч. пос. – М.: Высш. шк., 1986. – 240 с.

10. Мирошников В.В. Экспериментальное исследование магнитных полей рассеяния дефектов // Вісник Східноукраїнського національного університету. – Луганськ. – 2000. – Т. 32, № 10. – С. 154-158.

11. Богорош А.Т. Кристаллизационные волны при зарождении и росте монокристаллов // Доповіді НАНУ. – 1999. – № 12. – С. 82-90.

Поступила в редакцию 9.06.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.