УДК 519.95

Ю. П. ПЫТЬЕВ, Е. Н. ТЕРЕНТЬЕВ, С. С. ЗАДОРОЖНЫЙ

МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Хорошо известно [1], насколько важна автоматизация анализа изображений печатных и интегральных схем (ИС) в связи с задачей диагностики их дефектов и отказов, вызванных несовершенством технологии, нарушением условий эксплуатации и т. п. При этом, как правило, оптическое или электронно-микроскопическое изображение ИС следует анализировать (т. е. находить дефекты) путем сравнения морфологии эталонной (бездефектной) и исследуемой схемы. Вместе с тем двум морфологически эквивалентным схемам могут соответствовать значительно различающиеся распределения яркости на их изображениях. Поэтому известный [2] метод анализа, основанный на обнаружении дефектов путем вычитания изображения эталонной (бездефектной) схемы из изображения предъявленной, зачастую мало эффективен, поскольку на полученном «разностном» изображении не удается избавиться (свести к нулю яркости) от бездефектных элементов схемы.

Предлагаемый метод морфологического анализа изображений ИС отличается тем, что из предъявленного изображения вычитается другое изображение, имеющее форму эталона и яркости отдельных элементов, близкие соответствующим яркостям элементов изображения предъявленной схемы. Тем самым яркость непораженных (бездефектных) элементов оказывается возможным сделать близкой к нулю, в то время как яркость поражения (дефекта) таким образом не компенсируется. В результате такой обработки на «разностном» изображении оказываются наиболее яркими пораженные (дефектные) участки схемы.

Исходным объектом анализа в рассматриваемом методе является сама схема. Обозначим X множество на плоскости, занимаемое схемой, и $A_1, A_2, \ldots, A_n$ — подмножества X, обозначающие элементы или части элементов схемы и промежутки между ними. По определению X есть объединение множеств A_j, $j=1, \ldots, n$, а разбиение $X=\bigcup\limits_{j=1}^{n} A_j$ задает морфологию схемы.

Наблюдаемая в оптическом или в электронном микроскопе, схема порождает изображение $f(x)$, которое для простоты будем рассматривать на том же множестве X. С известным приближением можно считать, что

$$f(x)=\sum_{j=1}^{n} c_j\chi_j(x), \quad \chi_j(x)=\begin{cases} 1, & x\in A_j \\ 0, & x\overline{\in} A_j \end{cases}, \quad j=1, \ldots, n \tag{1}$$

где c_j — яркость на множествах A_j, т. е. яркость элементов схемы. В изображении $f(x)$ существенно, что яркость в пределах каждого элемента A_j постоянна и не важно, какие именно значения она принимают.

В задаче анализа ИС могут быть применены методы морфологического анализа изображений, развитые в работах [3, 4]. Суть их в данном случае сводится к следующему. На множестве изображений с конечной энергией $\|f\|^2=\int\limits_X f^2(x)\,dx<\infty$ определяется оператор P

$$Pf(x)=\sum_{j=1}^{n}\frac{\chi_j(x)}{\mu_j}\int\limits_{A_j} f(x)\,dx, \quad \mu_j=\int\limits_{A_j} dx, \quad j=1, \ldots, n, \tag{2}$$

называемый формой изображения (1), если в последнем все яркости попарно различны. В данном случае оператор P можно назвать формой схемы. Это название связано со следующим свойством P: для всякого изображения (1) $Pf(x)=f(x)$ и этим свойством обладают лишь изображения вида (1). Для любого другого изображения $\varphi(x)$ не представимого в виде (1), $P\varphi(x)\neq\varphi(x)$, причем $\|P\varphi\|<\|\varphi\|$, если $\varphi(x)$ отличается от (1) на подмножестве X конечной площади.

Пусть P — форма эталонной схемы и $\varphi(x)$ — изображение схемы, предъявляемой для анализа. Для определенности будем считать, что форма предъявленной схемы имеет дефект, который на изображении выглядит следующим образом:

$$\varphi(x) = c_1\chi_1(x) + c_2(\chi_2(x) - \chi_\delta(x)) + c_\delta\chi_\delta(x) + c_3\chi_3(x) + \ldots + c_n\chi_n(x), \qquad (3)$$

где δ означает подмножество A_2, на котором локализован дефект, c_δ — его яркость и $\chi_\delta(x) = \begin{cases} 1, & x \in \delta \\ 0, & x \overline{\in} \delta \end{cases}$. Согласно (2)

$$P\varphi(x) = c_1\chi_1(x) + c_2\chi_2(x) + (c_\delta - c_2)\chi_2(x)\frac{\mu_\delta}{\mu_2} + c_3\chi_3(x) + \ldots + c_n\chi_n(x) \qquad (4)$$

и, следовательно,

$$\varphi - P\varphi = (c_\delta - c_2)\chi_\delta(x) - (c_\delta - c_2)\frac{\mu_\delta}{\mu_2}\chi_2(x), \qquad (5)$$

где μ_δ — площадь δ. Если считать, что на изображении (5) яркость представлена абсолютными значениями коэффициентов при χ_δ и χ_2, то (поскольку обычно $\mu_\delta/\mu_2 \sim \sim 0{,}01$) получаем следующий результат: яркость дефекта δ на изображении $\varphi - P\varphi$ примерно в сто раз больше, чем яркость пораженного элемента схемы; яркость непораженных элементов равна нулю. Таким образом, оператор $\varphi - P\varphi$ позволяет классифицировать тип поражения, пораженные элементы и непораженные элементы схемы. На изображении $\varphi - P\varphi$ непораженные элементы имеют нулевую яркость, пораженные — малую, а дефекты — большую. При этом изображение $P\varphi$, как известно [3], наилучшим образом приближает входное изображение $\varphi(x)$ изображениями вида (1), а изображение $\varphi - P\varphi$ — наилучшим образом выделяет дефект.

Чтобы воспользоваться полученным результатом, на практике требуется предварительное совмещение изображения $\varphi(x)$ и формы P. Эта операция легко автоматизируется, поскольку практически $\|P\varphi\|$ достигает максимума при совмещении $\varphi(x)$ и P. Но и без этой автоматизации приведенный результат может эффективно использоваться при анализе ИС-схем, поскольку на изображении (5) фактически представлены лишь поражения и пораженные элементы ИС.

В настоящее время на физическом факультете МГУ создается прибор, позволяющий совместно с растровым электронным микроскопом реализовать методы морфологического анализа изображений с целью выявления дефектов ИС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Neve N. F. B., Hughes K. A., Thornton P. R. «J. Appl. Phys.», 1966, 37, N 4, 1704.
2. Judd G., Wilson R., Weiss H. «SEM-73». Proc. 6th Symp. SEM. JJTRJ, 1973. Chicago, p. 167—172.
3. Пытьев Ю. П. ДАН СССР, 1975, № 6, 224.
4. Пытьев Ю. П. «Кибернетика», 1975, № 3.

Поступила в редакцию
19.4 1976 г.

Кафедра
электроники

УДК 539.24:27;548.73

А. В. КОЛПАКОВ, Ю. П. ХАПАЧЕВ

ДИФРАКЦИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ В ТОНКОМ КРИСТАЛЛЕ С МОНОТОННЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ

Рассмотрим дифракцию рентгеновских лучей в тонких эпитаксиальных пленках полупроводниковых материалов, компоненты которых образуют непрерывный ряд твердых растворов во всем интервале концентраций $0 \leqslant x \leqslant 1$. Будем считать, что изменение периодов решетки таких пленок зависит линейно от концентрации x состава (закон Вегарда). Этому удовлетворяют трехкомпонентные твердые растворы на основе соединений полупроводников $A^{\mathrm{III}}B^{\mathrm{V}}$, $A^{\mathrm{II}}B^{\mathrm{VI}}$ или двухкомпонентные узкозонные полупроводники, например $Bi_{1-x}Sb_x$, и др.