

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

621.385.833

**ЦВЕТОКОДИРОВАННОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ
В РАСТРОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ***Г. В. Спивак, Э. И. Рау, А. Ю. Сасов*

С помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) можно получать различную информацию о структуре и физических свойствах объекта¹⁻³. В частности, РЭМ обеспечивает возможность локального элементного анализа вещества. Качественный или количественный анализ распределения химических элементов с различными атомными номерами проводится, в основном, в режимах рентгеновского излучения, катодолюминесценции, а также при регистрации отраженных и оже-электронов. Но при черно-белой визуализации в отраженных электронах практически невозможно идентифицировать элементы с мало отличающимися атомными номерами Z , так как человеческий глаз может различать не более 16 градаций черно-белого изображения.

В настоящей работе для исследования локальных свойств и структуры поверхности объекта применен принцип цветокодирования^{1,4-6}, так как число информативных цветов и оттенков, различаемых глазом, может быть на два-три порядка больше, чем при черно-белом восприятии. К тому же при качественном анализе в режиме отраженных электронов (ОЭ) нами использовался модифицированный бинарный детектор ОЭ, что в сочетании с цветокодированием видеосигнала позволило проводить оперативный сравнительный анализ с максимальным пространственным разрешением, довольно высокой чувствительностью и большой достоверностью⁶.

Искусственному «окрашиванию», в принципе, может подвергаться любой информативный сигнал в РЭМ, причем цветовое контрастирование улучшает визуальное восприятие и облегчает интерпретацию изображений⁶⁻⁹. Общим принципом цветокодирования является следующий прием. Серый спектр континуума видеосигнала «квантуется» на необходимое число уровней, каждому из которых приписывается по наперед заданному закону или по произвольному выбору свой цвет. Например, при исследовании объекта в режиме детектирования ОЭ используется то обстоятельство, что коэффициент отражения η электронов, а вместе с тем и интенсивность видеосигнала, определяется атомным номером Z вещества, облучаемого пучком высокоэнергетичных электронов. Доля η ОЭ с увеличением Z увеличивается почти монотонно, что демонстрирует на рис. 1, а график зависимости $\eta(Z)$ при энергии первичных электронов $E_0 > 10$ кэВ². Приведенный экспериментальный график довольно хорошо соответствует эмпирической зависимости³: $\eta = -0,254 + 0,016 Z - 0,000186 Z^2 + + 8,31 \cdot 10^{-7} Z^3$, учитывающей по элементарной теории ОЭ как однократные резерфордские рассеяния на кулоновском поле ядра атома, так

и многократные рассеяния на небольшие углы, когда электрон пучка взаимодействует с электронами атомов объекта.

При обычной регистрации сигнала ОЭ в РЭМ элемент с высоким атомным номером выглядит на экране белым, с низким Z — черным, а с промежуточными значениями соответствует разным градациям серого. Вместо того чтобы обрабатывать денситометрические кривые или градации серого изображения, оперативнее и точнее осуществлять визуальное опознавание

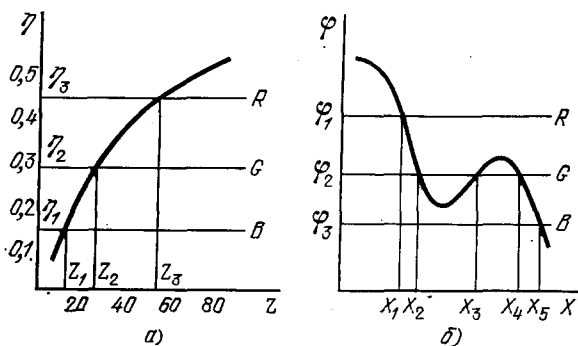


Рис. 1.

и идентификацию элементов на цветном экране монитора. Порядок следования цветов, адекватных величине Z , устанавливается произвольно в каждом эксперименте на тестовых (эталонных) образцах, когда каждому Z приписывается определенный цвет. При такой калибровке цвета обычно выбираются таким образом, чтобы соседние участки давали максимальный цветовой контраст на изображении. Система позволяет одновременно анализировать до 16 элементов, но, в принципе, это число можно

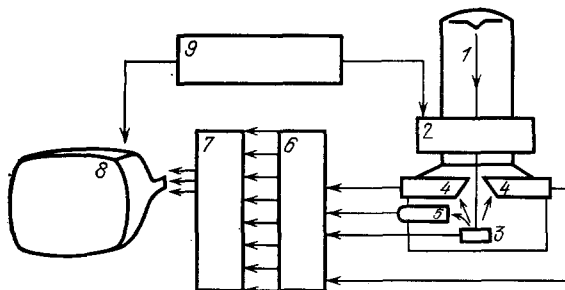


Рис. 2.

увеличить, добавив в радиоэлектронную схему сравнения соответствующее число дискриминаторов уровней.

На рис. 1, а химическому элементу с атомным номером Z_1 соответствует интенсивность сигнала, пропорциональная коэффициенту отражения η_1 , а «окрашивается» он условно, например синим цветом (B), элемент с номером Z_2 отображается зеленым (G), а элемент Z_3 красным (R) цветами, и т. д.

Если видеосигнал с РЭМ несет количественную информацию, получаемую с помощью соответствующих метрологических приставок и приемов, то цветокодирование позволяет отображать картину распределения

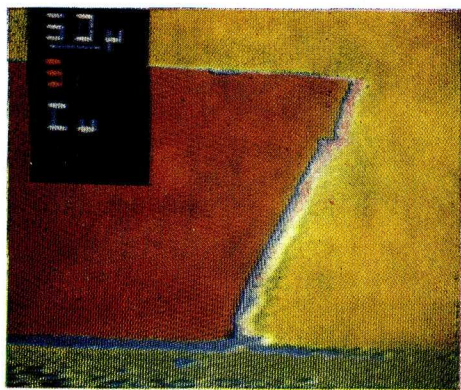


Рис. 3 (200×).

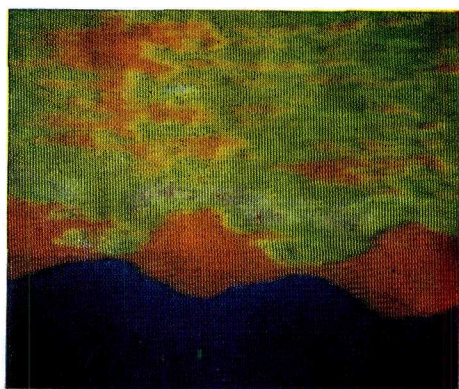


Рис. 4 (1000×).

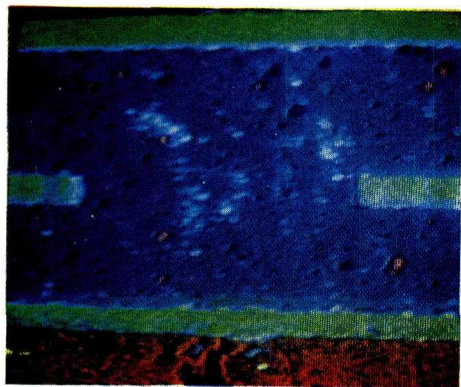


Рис. 5 (500×).

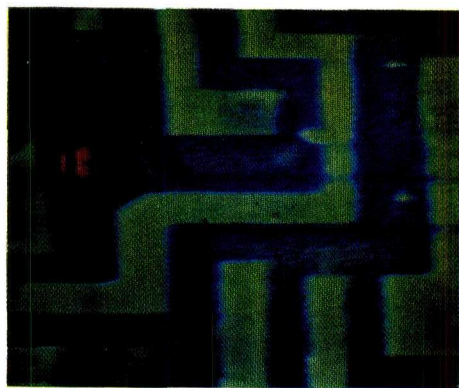


Рис. 6 (300×).

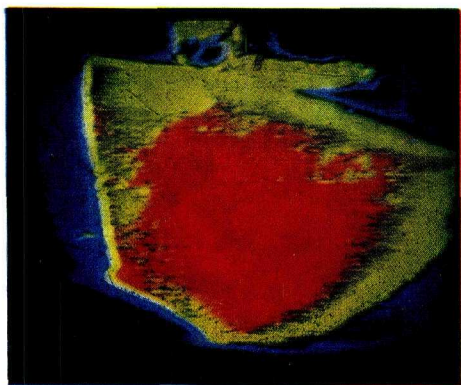


Рис. 7 (1000×).

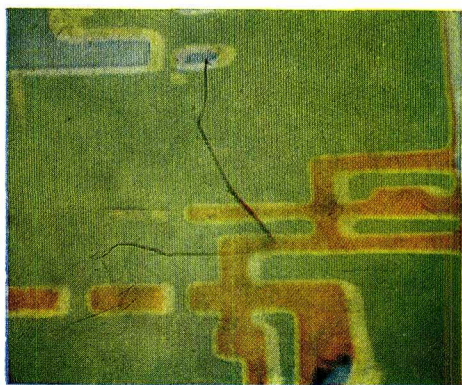


Рис. 8 (300×).

какого-либо характеристического параметра, например линии равной напряженности силового поля, карту распределения температур, потенциальный рельеф на поверхности и т. п.

В последнем случае, например, различные величины потенциала ϕ на поверхности твердого тела (полупроводникового прибора) метятся определенным цветом (рис. 1, б). Линеаризация потенциального контраста проводится при энергетическом анализе вторичных электронов с использованием отрицательной обратной связи при кадровой развертке^{10, 11}. Такой метод позволяет автоматически определять в любой координате X_i величину потенциала ϕ_i и ставить этому значению ϕ в соответствие любой цвет (см. рис. 1, б).

Упрощенная экспериментальная схема цветокодирования показана на рис. 2. Электронный зонд 1 РЭМ сканирует с помощью отклоняющих катушек 2 по образцу 3. ОЭ коллектируются двумя симметричными детекторами 4, а вторичные электроны улавливаются коллектором-анализатором 5. Сигналы с детекторов, а также с образца поступают на блок коммутации с многоканальными компараторами 6, где они «квантуются» на соответствующее число градаций. В цветокодирующей матрице 7 каждому интервалу градаций приписывается свой цвет. Выходные сигналы поступают на цветной монитор 8, синхронизированный по развертке с РЭМ устройством 9.

Как отмечалось выше, с помощью парносимметричной детекторной системы ОЭ возможен качественный экспресс-анализ образцов на элементный состав (при суммировании сигналов с обоих детекторов), причем влияние топографии поверхности в значительной мере подавляется. Поэлементный анализ проводится с пространственным разрешением в доли микрона и с разрешением по атомному номеру $\Delta Z = 1$ (для элементов в интервале $Z = 4-30$), $\Delta Z = 2$ ($Z = 30-60$) и $\Delta Z \geq 3$ при $Z > 60$. Такая неравнозначность по разрешению ΔZ обусловлена тем, что для фиксированного значения ΔZ различие в коэффициенте отражения η уменьшается с ростом Z (см. рис. 1, а).

В качестве иллюстрации на рис. 3 (цветная вклейка) показано цветокодированное изображение кремниевометаллического спая, где четко различаются следующие компоненты: никель (зеленый), медь (синий), кремний (красный), олово (желтый). В данном случае демонстрируется хорошее разрешение по атомному номеру $\Delta Z = 1$ между Ni ($Z = 28$) и Cu ($Z = 29$), которые на обычном черно-белом экране монитора неразличимы. Масштабная метка и анализируемые элементы указаны в знаковой зоне в левом верхнем углу снимка.

Интерметаллидная прослойка и диффузионная пористость в паяном шве хорошо различаются на рис. 4, где приводится микроструктура соединения коваровой крышки (синий цвет) с основания корпуса интегральной схемы (зеленый), выполненного на основе припоя с высоким содержанием олова (красный).

Изображение шлифа тиристорной структуры приводится на рис. 5, где видны следующие элементы; Mo — зеленый, Fe — красный, Si — синий.

Рис. 6 иллюстрирует неоднородности окисного покрытия и шин металлизации одной из дефектных интегральных схем. Здесь зеленый цвет соответствует поверхностной металлизации, а синий — межслойной изоляции. На этом снимке хорошо заметны технологические дефекты, обусловленные образованием отростков и разрывов на шинах металлизации, что является потенциальной причиной пробоев, коротков, отказов в работе схем. Изображения, подобные приведенному на рис. 6, открывают большие возможности автоматизации визуального анализа топологии

интегральных схем, так как позволяют оперативно устанавливать распределение материалов в готовой структуре по их «цветам». Далее изображение каждого фрагмента (распределение элементов или параметров) может быть отдельно проконтролировано по цветовому совпадению с эталонной структурой.

Применение системы цветокодирования позволяет проводить визуальный контроль качества не только пассивных (см. рис. 6), но и активных элементов полупроводниковых приборов. Так на рис. 7 показано инородное включение (преципитат SiO_2 — красный) в планарном кремниевом р — n-переходе фотопреобразователя (синий). Изображение получено в режиме наведенного тока. Зеленый ореол вокруг дефектного образования обусловлен, вероятно, латеральным полем, образованным градиентом концентрации примеси, декорирующей преципитатный комплекс.

На рис. 8 показан потенциальный контраст интегральной схемы, снятый в режиме вторичной электронной эмиссии с цветокодированием электрических микрополей. Здесь красным, зеленым, голубым и желтым цветом отображены распределения различных потенциалов ϕ , принцип кодирования в цвет которых поясняется на рис. 1, б.

Экспериментальная проверка показала довольно высокую эффективность и универсальность принципа цветокодирования для отображения различной информации в РЭМ. Пространственное разрешение при анализе элементного состава в режиме ОЭ при цветокодировании выше, чем при рентгеноструктурном и катодолюминесцентном анализах. Отношение сигнал/шум при визуализации структур с низкими атомными номерами также больше. В принципе качественный анализ с помощью цветокодирования в ОЭ может хорошо дополнять количественный рентгеновский, особенно при визуализации распределения легких элементов.

Что касается отображения на снимках определенных уровней равного сигнала — изолиний, — то цветокодирование позволяет проводить количественное картографирование исследуемых параметров объекта.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Деркач В. П., Кияшко Г. Ф., Кухарчук М. С. Электроннозондовые устройства. — Киев: Наукова думка, 1974 г.
2. Практическая растровая электронная микроскопия/Пер. под ред. В. И. Петрова. — М.: Мир, 1978.
3. Reimer L., Pfefferkorn G. Raster-Elektronenmikroskopie. — Berlin; New York: Springer-Verlag, 1977.
4. Swift J., Brown A. — J. Microscopy, 1975, v. 105, p. 1.
5. Hörl E., Buschbeck F. Beiträge zur Elektronenmikroskopie (Hrsg. G. Pfefferkorn. Münster), 1975, Bd. 8, S. 233.
6. Рау Э. И., Сасов А. Ю., Спивак Г. В., Рау Э. И. — Scanning, 1980, v. 3, p. 242; Сасов А. Ю., Спивак Г. В., Рау Э. И. — Изв. АН СССР. Сер. физ., 1980, т. 44, с. 1142.
7. Спивак Г. В., Сапарин Г. В., Антошин М. К. — УФН, 1974, т. 113, с. 695.
8. Обыден С. К., Сапарин Г. В., Спивак Г. В., Тепляков А. Г., Попов С. И. — Изв. АН СССР. Сер. физ., 1980, т. 44, с. 1142.
9. Statham P., Jones M. — Scanning, 1980, v. 3, p. 168.
10. Спивак Г. В., Рау Э. И., Карелин Н. М., Назаров М. В. — Микроэлектроника, 1978, т. 7, с. 212.
11. Dinnis A. R. — Scanning, 1980, v. 3, p. 172.