

УДК 621.397.133

## Особенности формирования стереоскопических изображений растровым электронным микроскопом\*

Г.В. МАМЧЕВ

630102, РФ, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, доктор технических наук, профессор.  
E-mail: mamtchev@sibsutis.ru

Растровые электронные микроскопы (РЭМ) являются эффективным средством анализа внутренней структуры микрообъектов, широко используемым в научных исследованиях, в системах контроля различных технологических процессов промышленного производства отдельных деталей, имеющих микроразмеры. В РЭМ учитывается изменение вторичной электронной эмиссии, возникающей под действием первичных электронов сканируемого зонда, обусловленное разницей в топографии исследуемых микрообразцов. Сигнал с коллектора, улавливающего вторичные электроны, после усиления преобразуется в телевизионное изображение, воспроизводимое жидкокристаллическим экраном (ЖКЭ). Конструкция РЭМ легко может быть приспособлена для получения стереоскопических изображений за счет изменения угла падения электронного зонда в процессе сканирования поверхности микрообъектов, осуществляемого с помощью дополнительной отклоняющей системы. Практический диапазон дополнительного изменения угла наклона электронного зонда находится в пределах  $2...10^\circ$ . При механическом наклоне исследуемых микрообъектов с помощью гониометра появляется возможность получения многокурсовых изображений. При реализации стереоскопического режима работы РЭМ появляется новая возможность оценки относительного расположения отдельных элементов или самих микрообъектов в трехмерном пространстве, увеличивается распознаваемость и дешифрируемость объектов рассматривания. Фактически в три раза выше точность оценки абсолютной удаленности наблюдаемых деталей по сравнению с восприятием двумерных изображений. В статье приведены аналитические выражения, характеризующие отображение трехмерных микрообъектов как в заэкранном, так и в предэкранном стереоскопических пространствах ЖКЭ, что позволяет оценить геометрические искажения стереомодели микрообъектов. Геометрически верное отображение трехмерных свойств микрообразцов возможно только при воспроизведении псевдоскопических изображений, наблюдаемых в предэкранном пространстве ЖКЭ. Установлено, что потенциально достижимый порог глубинного разрешения РЭМ стереоскопического типа зависит от коэффициента увеличения микроскопа, числа воспроизводимых пикселей ЖКЭ, угла наклона электронного зонда. На основании расчетов установлено, что в большинстве практических случаев число разрешаемых планов по глубине может достигать 25.

**Ключевые слова:** растровый электронный микроскоп, отображение трехмерного пространства, стереоэффект, стереоскопическая модель микрообъектов, электронный зонд, электронно-оптическая отклоняющая система, стереопара, жидкокристаллический экран, геометрические искажения, глубинная разрешающая способность

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-1-94-106

---

\* Статья получена 2 октября 2014 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Для исследования тонкой внутренней структуры веществ при глубине фокуса, недоступной оптическим микроскопам, широкое применение получили растровые электронные микроскопы (РЭМ), в которых учитывается изменение вторичной электронной эмиссии, обусловленное разницей в топографии исследуемых микрообразцов [1–10]. Подобные устройства сравнительно легко могут быть приспособлены для получения стереоскопических изображений за счет изменения угла падения электронного луча на микрообъект [11–17]. В этом случае появляется принципиально новая возможность оценки относительного расположения объектов в трехмерном физическом пространстве. Фактически в три раза выше точность оценки абсолютной удаленности наблюдаемых деталей по сравнению с восприятием двумерных изображений, увеличивается распознаваемость и дешифрируемость объектов рассматривания.

С целью определения уровня геометрических искажений отображения трехмерного микропространства, точности оценки глубинных соотношений в статье получены аналитические выражения, характеризующие воспроизведение стереоскопических изображений в РЭМ, произведена количественная оценка деформаций воспринимаемой стереомодели, выполнен расчет глубинной разрешающей способности в реальных условиях использования РЭМ.

## 1. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РЭМ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОГО ТИПА

В РЭМ электронной пушкой формируется остророфокусированный электронный луч (зонд), с помощью которого осуществляется многократный, последовательный во времени анализ рельефа микрообъекта. Вторичные электроны, возникающие под действием первичных электронов зонда, улавливаются коллектором, сигнал с которого после усиления преобразуется в телевизионное изображение на жидкокристаллическом экране (ЖКЭ) [18–20]. При этом развертывающие устройства электронного луча РЭМ и драйверы строк и столбцов ЖКЭ синхронизированы.

Конструктивно РЭМ стереоскопического типа от обычного отличается наличием дополнительных отклоняющих систем при условии, что основная электронно-оптическая отклоняющая система РЭМ обеспечивает развертку электронного зонда  $i_{\text{д}}$  по поверхности микрообъекта аналогично развертке электронного луча в обычном телевизионном датчике (рис. 1). В этом случае, изменив на величину  $\alpha_{\text{эд}}$  вправо и влево от центральной оси колонны микроскопа угол падения электронного зонда  $i_{\text{д}}$  на микрообъект с помощью дополнительных отклоняющих систем, можно последовательно во времени получить стереопару изображений. Причем изображение микрообъекта во вторичных электронах  $i_{\text{вт}}$  сходно с изображением в световых лучах, полученном при падении на микрообъект освещающего пучка света под определенным углом. Практически диапазон дополнительного изменения угла наклона электронного зонда  $2\alpha_{\text{эд}}$  в РЭМ стереоскопического типа находится в пределах  $2 \dots 10^\circ$ . Из рис. 1 следует, что величина  $b_{\text{эКВ}}$ , соответствующая стереоско-

пическому базису, определяющему степень воспроизводимого стереоэффекта, оценивается следующим соотношением:

$$b_{\text{ЭКВ}} = 2L_{\text{ЭЛ}} t_g \alpha_{\text{ЭЛ}},$$

где  $L_{\text{ЭЛ}}$  – расстояние от центра электронно-оптической отклоняющей системы  $10$  до объекта исследования.

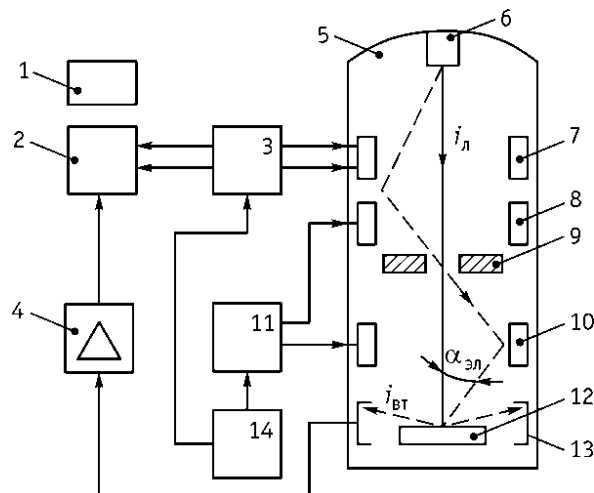


Рис. 1. Структурная схема растрового электронного микроскопа стереоскопического типа:

1 – устройство пространственной селекции изображений стереопары; 2 – ЖКЭ; 3 – драйверы строк, столбцов ЖКЭ и разветвляющие устройства электронного зонда РЭМ; 4 – видеоусилительный тракт; 5 – колонна микроскопа; 6 – электронная пушка; 7 – отклоняющая система (основная электронно-оптическая); 8, 10 – дополнительные отклоняющие системы; 9 – диафрагма; 11 – устройство формирования дополнительных отклоняющих токов; 12 – микрообъект; 13 – коллектор электронов; 14 – синхрогенератор

В некоторых конструкциях РЭМ для получения изображений стереопары используется механический наклон микрообъектов с помощью, например, гониометра. Таким способом удобнее всего получать многоракурсные изображения микрообъектов.

Схема получения изображений стереопары микрообъекта в РЭМ аналогична оптической схеме стереотелевизионного датчика «бегущий луч» со скрещенными оптическими осями. В этом случае изображения стереопары микрообъекта будут отображаться на ЖКЭ монитора с трапецидальными искажениями как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях, величина которых может быть переменной при изменении угла падения электронного зонда в процессе проведения исследований.

## 2. ПОЛУЧЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ ВЫРАЖЕНИЙ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ОТОБРАЖЕНИЕ ТРЕХМЕРНОГО МИКРОПРОСТРАНСТВА В РЭМ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОГО ТИПА

Изменение угла падения электронного зонда относительно центральной оси колонны РЭМ позволяет наблюдать псевдоскопическую стереомодель микрообъекта в предэкранном пространстве относительно плоскости ЖКЭ (рис. 2).

Анализ схемы получения изображений стереопары, представленной на рис. 2, с использованием теоремы синусов позволяет определить значения координат  $(x_{л.тр}, x_{п.тр}, z_{тр})$  точки объекта  $D(X, Y, Z)$ , находящейся, например, в первом квадранте координатной системы  $ZOX$  физического пространства, в изображениях стереопары, сформированных РЭМ в плоскости ЖКЭ с трапецидальными искажениями.

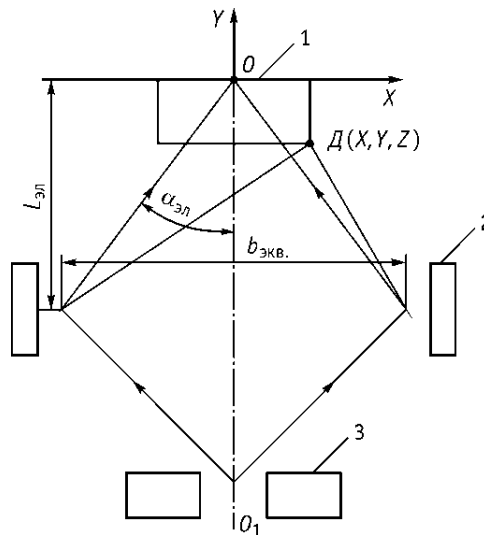


Рис. 2. Схема формирования изображений стереопары в растровом электронном микроскопе стереоскопического типа:

1 – анализируемый микрообъект; 2 – дополнительная электронно-оптическая отклоняющая система; 3 – диафрагма

На основе выполненного анализа схемы отображения трехмерного микропространства получены соотношения:

$$\begin{cases} x_{л.тр} = Q_{РЭМ} L_{эл} \operatorname{tg} \arcsin \left( A \cos \alpha_{эл} / \sqrt{A^2 + C^2 + 2AC \sin \alpha_{эл}} \right), \\ x_{п.тр} = Q_{РЭМ} L_{эл} \operatorname{tg} \arcsin \left( B \cos \alpha_{эл} / \sqrt{B^2 + C^2 - 2BC \sin \alpha_{эл}} \right), \\ z_{тр} = (z_{л.тр} + z_{п.тр}) / 2, \end{cases} \quad (1)$$

причем

$$z_{л.тр} = \frac{L_{эл} Q_{РЭМ} Z}{\sqrt{A^2 + C^2 + 2AC \sin \alpha_{эл}} \cos \arcsin \frac{A \cos \alpha_{эл}}{\sqrt{A^2 + C^2 + 2AC \sin \alpha_{эл}}}}, \quad (2)$$

$$z_{п.тр} = \frac{L_{эл} Q_{РЭМ} Z}{\sqrt{A^2 + C^2 - 2BC \sin \alpha_{эл}} \cos \arcsin \frac{B \cos \alpha_{эл}}{\sqrt{B^2 + C^2 - 2BC \sin \alpha_{эл}}}}, \quad (3)$$

где  $Q_{РЭМ}$  – коэффициент увеличения РЭМ. В выражениях (1)–(3) дополнительно приняты следующие обозначения:

$$A = X + |Y| \operatorname{tg} \alpha_{эл}, \quad B = X - |Y| \operatorname{tg} \alpha_{эл}, \quad C = L_{эл} - |Y| \cos \alpha_{эл}.$$

В случае проведения прецизионных метрических операций с геометрическими параметрами микрообъектов трапецидальные искажения изображений стереопары следует компенсировать. При этом значения координат ( $x_{л}$ ,  $x_{п}$ ,  $z$ ) и параллакса  $p$  точек микрообъекта в изображениях стереопары РЭМ в плоскости ЖКЭ после коррекции трапецидальных искажений определяются системой соотношений (4), полученной на основе выражений (1)–(3).

$$\begin{aligned} x_{л,п} &= (X \pm |Y| \operatorname{tg} \alpha_{эл}) / (L_{эл} - |Y|), \\ z &= Z / (L_{эл} - |Y|), \\ p &= 2|Y| \operatorname{tg} \alpha_{эл} / (L_{эл} - |Y|). \end{aligned} \quad (4)$$

В РЭМ стереоскопического типа можно также воспроизводить и ортоскопические изображения, наблюдаемые в заэкранном пространстве, путем замены левого изображения стереопары правым, и наоборот.

Анализ схемы визуального восприятия стереоэффекта с использованием соотношений (4) позволяет определить аналитические выражения, непосредственно связывающие координаты  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  отдельных точек, например  $D$ , в анализируемом микрообъекте с соответствующими координатами  $X'$ ,  $X''$ ,  $Y'$ ,  $Y''$ ,  $Z'$ ,  $Z''$  точек стереоскопической модели в заэкранном и предэкранном пространствах. Так, для точки  $D$  микрообъекта справедливы следующие системы соотношений, соответствующие условиям наблюдения как ортоскопических, так и псевдоскопических стереоизображений:

$$\begin{cases} X', X'' = \frac{Q_{РЭМ} L_{эл} b_0 X}{b_0 (L_{эл} - |Y|) \mp 2 Q_{РЭМ} L_{эл} |Y| \operatorname{tg} \alpha_{эл}}, \\ Y', |Y''| = \frac{2 Q_{РЭМ} L_{эл} |Y| \operatorname{tg} \alpha_{эл}}{b_0 (L_{эл} - |Y|) \mp 2 Q_{РЭМ} L_{эл} |Y| \operatorname{tg} \alpha_{эл}}, \\ Z', Z'' = \frac{Q_{РЭМ} L_{эл} b_0 Z}{b_0 (L_{эл} - |Y|) \mp 2 Q_{РЭМ} L_{эл} |Y| \operatorname{tg} \alpha_{эл}}. \end{cases} \quad (5)$$

В данном случае координаты элементов микрообъекта, воспринимаемые в заэкранном и предэкранном трехмерных пространствах, обозначаются соответственно знаками «'» и «''».

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОТОБРАЖЕНИЯ ТРЕХМЕРНОГО ПРОСТРАНСТВА РЭМ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОГО ТИПА

С целью количественной оценки геометрических искажений воспроизводимой стереоскопической модели микрообъектов воспользуемся системой соотношений (5) для вывода аналитических выражений результирующих коэффициентов масштабного увеличения РЭМ в направлении осей  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$ :  $K'_x = X'/X$ ,  $K'_y = Y'/Y$ ,  $K'_z = Z'/Z$ ;  $K''_x = X''/X$ ,  $K''_y = Y''/Y$ ,  $K''_z = Z''/Z$ , которые учитывают увеличение микроскопа и процесс восприятия геометрических соотношений в трехмерном образе микрообъектов. Равенство между собой результирующих коэффициентов масштабного увеличения РЭМ стереоскопического типа как в заэкранном, так и предэкранном трехмерных пространствах, т. е.  $K'_x = K'_y = K'_z = K'_{\text{общ}}$  и  $K''_x = K''_y = K''_z = K''_{\text{общ}}$ , обеспечивается при условии  $l = b_0/2tg\alpha_{\text{эл}}$ , где  $l$  – расстояние рассматривания изображений стереопары микрообъекта, воспроизводимых ЖКЭ;  $b_0$  – величина глазного базиса человека, в среднем равная 65 мм. В этом случае справедливы соотношения:

$$K'_{\text{общ}} = \frac{Q_{\text{РЭМ}}L_{\text{эл}}b_0}{b_0(L_{\text{эл}} - |Y|) - 2Q_{\text{РЭМ}}L_{\text{эл}}|Y|tg\alpha_{\text{эл}}}, \quad (6)$$

$$K''_{\text{общ}} = \frac{Q_{\text{РЭМ}}L_{\text{эл}}b_0}{b_0(L_{\text{эл}} - |Y|) + 2Q_{\text{РЭМ}}L_{\text{эл}}|Y|tg\alpha_{\text{эл}}}, \quad (7)$$

из которых следует, что для каждой точки микрообъекта коэффициенты  $K'_{\text{общ}}$ ,  $K''_{\text{общ}}$  являются функциями ординаты  $|Y|$ . Для количественного сравнения условий отображения элементов микрообъекта с различными значениями ординаты  $|Y|$  на рис. 3 приведены рассчитанные по выражениям (6) и (7) зависимости коэффициентов  $K'_{\text{общ}}$ ,  $K''_{\text{общ}}$ . Данный расчет сделан для случая, когда  $Q_{\text{РЭМ}} = 4000$ ,  $L_{\text{эл}} = 400$  мм,  $b_0 = 65$  мм,  $\alpha_{\text{эл}} = 1 \dots 5^\circ$ . Из рассмотрения графических зависимостей рис. 3 видно, что при визуальном наблюдении стереоскопическая модель микрообъекта воспринимается геометрически искаженной как при воспроизведении ортоскопических, так и псевдоскопических изображений (значения коэффициентов  $K'_{\text{общ}}$  возрастают, а  $K''_{\text{общ}}$  уменьшаются по мере увеличения координаты  $|Y|$ ).

При воспроизведении псевдоскопических изображений при соблюдении равенства  $l = Q_{\text{РЭМ}}L_{\text{эл}}$  имеется возможность обеспечить геометрически верное отображение трехмерных свойств микрообъектов (независимость коэффициентов  $K''_{\text{общ}}$  от  $|Y|$ ).

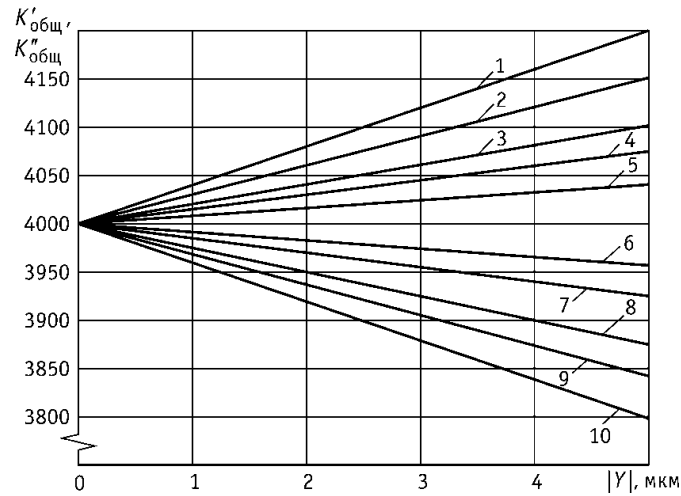


Рис. 3. Зависимости результирующих коэффициентов масштабного увеличения растрового электронного микроскопа стереоскопического типа от ординаты точки контроля микрообъекта:

ортоскопические изображения: 1 –  $\alpha_{эЛ} = 5^\circ$ ; 2 –  $\alpha_{эЛ} = 4^\circ$ ;  
 3 –  $\alpha_{эЛ} = 3^\circ$ ; 4 –  $\alpha_{эЛ} = 2^\circ$ ; 5 –  $\alpha_{эЛ} = 1^\circ$ ; псевдоскопические изображения: 6 –  $\alpha_{эЛ} = 1^\circ$ ; 7 –  $\alpha_{эЛ} = 2^\circ$ ; 8 –  $\alpha_{эЛ} = 3^\circ$ ; 9 –  $\alpha_{эЛ} = 4^\circ$ ;  
 10 –  $\alpha_{эЛ} = 5^\circ$

#### 4. ГЛУБИННАЯ РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ РЭМ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОГО ТИПА

Потенциально достижимый порог глубинного разрешения РЭМ стереоскопического типа  $\Delta Y$  можно оценить аналитическим способом, используя выражения, связывающие координаты стереоскопической модели с соответствующими координатами самого микрообъекта. Из анализа соотношений (5) с учетом рис. 2 следует, что в предэкранном пространстве

$$\Delta Y_{\text{ср}} = \frac{1}{2} [\Delta Y_{\text{max}} (\text{при } Y \rightarrow 0) + \Delta Y_{\text{min}} (\text{при } Y \rightarrow 0) Y_{\text{max}}],$$

причем

$$\Delta Y_{\text{max}} = \frac{p_{\Sigma} L_{\text{эЛ}}}{2Q_{\text{РЭМ}} L_{\text{эЛ}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{эЛ}} + p_{\Sigma}},$$

$$\Delta Y_{\text{min}} = \frac{p_{\Sigma} (L_{\text{эЛ}} - Y_{\text{max}})}{2Q_{\text{РЭМ}} L_{\text{эЛ}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{эЛ}} - 2Q_{\text{РЭМ}} Y_{\text{max}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{эЛ}} + p_{\Sigma}},$$

где  $p_{\Sigma} = p \pm \Delta p_{\Sigma}$  при  $P = 0,95$ .

В данном случае под  $p$  понимается линейный горизонтальный параллакс, соответствующий разрешаемой разности параллактических углов, а под  $\Delta p_{\Sigma}$  при  $P = 0,95$  – суммарная погрешность, пересчитанная в плоскость ЖКЭ, учитывающая возможные искажения горизонтального параллакса, при дове-

рительной вероятности  $P = 0,95$ . Так как практически  $L_{\text{ЭЛ}} \gg Y_{\text{max}}$ , то можно считать, что

$$\Delta Y_{\text{ср}} \approx p_{\Sigma} / 2Q_{\text{РЭМ}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{ЭЛ}}.$$

При оценке абсолютного линейного порога глубинного разрешения предположим, что рассматривание стереоскопических изображений осуществляется на ЖКЭ с диагональю 25" при  $Q_{\text{РЭМ}} = 500 \dots 4000$ ,  $L_{\text{ЭЛ}} = 400$  мм,  $\alpha_{\text{ЭЛ}} = 1 \dots 5^\circ$ ,  $l \approx 800$  мм, числе воспроизводимых пикселей в вертикальном направлении  $z = 600 \dots 1080$ , что соответствует реальным условиям получения и наблюдения трехмерных изображений микрообъектов. Результаты расчета числа разрешаемых планов по глубине микрообъектов  $\Pi_{\text{пл}}$  и абсолютного линейного порога глубинного разрешения представлены в виде графической зависимости  $\Pi_{\text{пл}} = f(z)$  на рис. 4 и в табл. 1, которые могут использоваться для определения глубинной разрешающей способности и детальности отображения микропространства РЭМ стереоскопического типа в различных практических случаях.

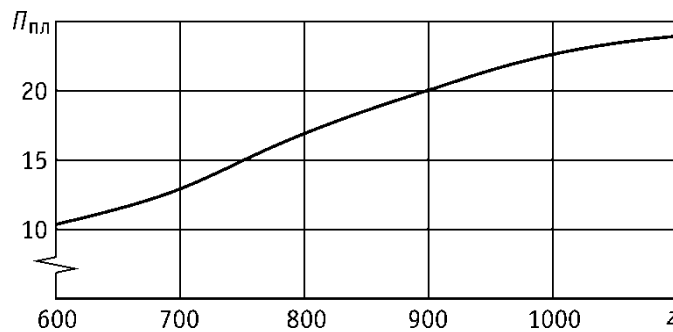


Рис. 4. Зависимость числа разрешаемых планов по глубине стереоскопической модели микрообъекта от количества строк разложения в изображениях стереопары

**Значения абсолютного линейного порога глубинного разрешения при различных параметрах РЭМ стереоскопического типа**

$\alpha_{\text{ЭЛ}}$ , град	$Q_{\text{РЭМ}}$	$\Delta Y_{\text{ср}}$ , мкм					
		$z$					
		600	700	800	900	1000	1080
1	500	67,2	60	52,5	46,7	42	37,3
	1000	33,6	30	26,3	23,3	21	18,7
	4000	8	7,14	6,25	5,6	5	4,4
5	500	13,4	12	10,5	9,3	8,4	7,5
	1000	6,7	6	5,25	4,7	4,2	3,73
	4000	1,6	1,43	1,25	1,1	1	0,9



Дальнейшее увеличение числа воспроизводимых пикселей по вертикали ЖКЭ  $z$  приведет к незначительному росту значения  $\Pi_{\text{пл}}$  и снижению абсолютного линейного порога глубинного разрешения  $\Delta Y_{\text{ср}}$  из-за ограниченной разрешающей способности зрительного аппарата человека.

## ВЫВОДЫ

Анализ математической модели отображения трехмерного пространства РЭМ стереоскопического типа показал, что геометрические искажения отсутствуют только в псевдоскопических изображениях (предэкранное пространство) при соблюдении равенства  $l = Q_{\text{РЭМ}} L_{\text{эл}}$ . Число разрешаемых планов по глубине может достигать 25.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современные методы микроскопии в изучении биологических объектов / Н.И. Потатуркина-Нестерова, И.С. Немова, М.Н. Артамонова, Е.А. Горельникова, А.А. Куяров, Л.П. Потехина, О.А. Радаева, Н.Е. Самышкина // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. – С. 29–33.
2. Кускова А.Н., Жигалина О.М., Мухортов В.М. Анализ дислокационной структуры эпитаксиальных пленок титаната бария-стронция, выращенных на подложках MgO, с помощью картин Муара // XXIV Российская конференция по электронной микроскопии РКЭМ–2012, 29 мая–1 июня 2012 г.: тезисы докладов. – Черноголовка, 2012. – С. 36–37.
3. Сканирующая электронная микроскопия как метод изучения микроскопических объектов электролитического происхождения / И.С. Ясников, Ю.С. Нагорнов, И.В. Горбачев, Р.Р. Микеев, П.С. Садовников, Н.Ю. Шубчинская, А.В. Аминаров // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 1–3. – С. 758–764.
4. Растровая электронная микроскопия для нанотехнологий: методы и применения / под ред. У. Жу, Ж.Л. Уанг; пер. с англ.: С.А. Иванов, К.И. Домкин. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 600 с.
5. Влияние толщины на доменную структуру пленок Ba<sub>0.8</sub>Sr<sub>0.2</sub>TiO<sub>3</sub> на подложках MgO / А.Н. Кускова, Р.В. Гайнутдинов, О.М. Жигалина, В.М. Мухортов // Труды XVIII Российского симпозиума по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел (РЭМ–2013), 3–7 июня 2013 г. – Черноголовка, 2013. – С. 384.
6. Кускова А.Н., Жигалина О.М. Исследование границы раздела гетероструктуры Ba(Sr)TiO<sub>3</sub>/MgO методом HAADF STEM // XXV Российская конференция по электронной микроскопии и 2-я Школа молодых ученых «Современные методы электронной и зондовой микроскопии в исследованиях наноструктур и наноматериалов»: РКЭМ–2014, 2 июня–6 июня 2014 г.: тезисы докладов. – Черноголовка, 2014. – Т. 1. – С. 30–31.
7. Lagar J.H., Raborar M.G.C. Material contrast identification and compositional contrast mapping using back scattered electron imaging // Proceedings of 20th IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA 2013), 15–19 July 2013. – Suzhou, China, 2013. – P. 464–469. – doi: 10.1109/IPFA.2013.6599201.
8. Generator of signals of reamer in scan television microscope // V. Vasilyuk, V. Goy, M. Nakonechnyi, A. Rehush // Proceedings of International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET 2012), 21–24 February 2012. – Lviv, Ukraine, 2012. – P. 157.

9. Scanning electron microscope: advantages and disadvantages in imaging components and applications [Electronic resource] // MicroscopeMaster.com: website. – URL: <http://www.microscopemaster.com/scanning-electron-microscope.html> (accessed: 12.02.2015).

10. *Swapp S.* Scanning electron microscopy (SEM) [Electronic resource] // Geochemical Instrumentation and Analysis: browse collection. – URL: [http://serc.carleton.edu/research\\_education/geochemsheets/techniques/SEM.html](http://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/SEM.html) (accessed: 12.02.2015).

11. *Yuan H., Calic J., Kondoz A.* Quality of interaction experience in stereoscopic 3D TV // Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP 2014), 27–30 October 2014. – Paris, France, 2014. – P. 748–752. – doi: 10.1109/ICIP.2014.7025150.

12. *Cellatoglu A., Balasubramanian K.* Autostereoscopic imaging techniques for 3D TV: proposals for Improvements // Journals of Display Technology. – 2013. – Vol. 9, iss. 8. – P. 666–672. – doi: 10.1109/JDT.2013.2257983.

13. *Kwak Y., Lee S., Yang S.* Crosstalk characterization method for stereoscopic three-dimensional television // IEEE Transactions on Consumer Electronics. – 2012. – Vol. 58, iss. 4. – P. 1411–1415. – doi: 10.1109/TCE.2012.6415014.

14. Investigation and evaluation of pointing modalities for interactive stereoscopic 3D TV / *H. Yuan, J. Calic, A. Fernando, A. Kondoz* // Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME 2013), 15–19 July 2013. – San Jose, California, USA, 2013. – P. 1–6. – doi: 10.1109/ICME.2013.6607621.

15. *Boehs G., Vieira M.L.H.* Stereoscopic image quality in virtual environments // Proceedings of IEEE International Conference on 3D Imaging (IC3D 2014), 9–10 December 2014. – Liege, Belgium, 2014. – P. 1–8. – doi: 10.1109/IC3D.2014.7032573.

16. 3D TV without glasses! Autostereoscopic changes 3D TV [Electronic resource]. – URL: <http://revision3.com/hak5/autostereoscopic-tvs-ces/> (accessed: 12.02.2015).

17. Stereoscopic television [Electronic resource] // ITU publications. – URL: [www.itu.int/pub/R-QUE-SG06.125/ru/](http://www.itu.int/pub/R-QUE-SG06.125/ru/) (accessed: 12.02.2015).

18. *Zeng M., Nguyen T.* Crosstalk modeling, analysis, simulation and cancellation in passive-type stereoscopic LCD displays // Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2013), 26–31 May 2013. – British Columbia, Canada, 2013. – P. 1840–1844. – doi: 10.1109/ICASSP.2013.6637971.

19. A viewing angle switching panel using guest-host liquid crystal [Electronic resource] / *C.P. Chen, K.-H. Kim, T.-H. Yoon, J.C. Kim* // Japanese Journal of Applied Physics. – 2009. – Vol. 48, no. 6R. – Art. 062401. – URL: [iopscience.iop.org/1347-4065/48/6R/062401](http://iopscience.iop.org/1347-4065/48/6R/062401) (accessed: 12.02.2015).

20. *Wong K.T.* The use of the liquid crystal display (LCD) panel as a teaching aid in medical lectures // Medical Teacher. – 1992. – Vol. 14, no. 1. – P. 33–36. – doi: 10.3109/01421599209044012. – URL: [www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1376854](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1376854) (accessed: 12.02.2015).

*Мамчев Геннадий Владимирович*, доктор технических наук, профессор, академик МАИ, член-корреспондент АИН РФ, заведующий кафедрой радиовещания и телевидения СибГУТИ. Основное направление научных исследований – телевизионные системы вещательного и прикладного назначения. Имеет более 70 публикаций, в том числе 3 монографии. E-mail: [mamtchev@sibsutis.ru](mailto:mamtchev@sibsutis.ru)

## ***Peculiarities of forming stereoscopic images by the raster electron microscope \****

G.V. MAMCHEV

*Siberian State University of Telecommunications and Information, 86 Kirov St., Novosibirsk, 630102, Russian Federation, D.Sc.(Eng.) professor. E-mail: mamtchev@sibsutis.ru*

Raster electron microscopes (REM) are effective means of the microobject inner structure analysis. They are wide used in scientific investigations, in control systems of various technological processes of industrial production of microsized parts. Changes in secondary electron emission which occur after the primary electron action of a scanning probe are taken into account in raster electron microscopes. These changes depend on a disparity in the topography of investigated microobjects. Signals from the probe which detects second electrons after amplification are converted into television images which are reproduced on a liquid crystal panel. The structure of a raster electron microscope may easily be adjusted for receiving stereoscopic images by changing an incidence angle of an electronic probe in the process of microobject surface scanning which is fulfilled by a supplementary deflecting system. An additional change in the incidence angle of an electronic probe may range from 2 to 10°. If microobjects are mechanically inclined by the goniometer, multiangle images can be obtained. When a stereoscopic mode of the REM operation is implemented, a possibility of estimating microobject relative position in the three-dimensional space appears. The identifiability and decoding of microobjects increase. The accuracy of estimating the absolute distance of the observed parts is three times higher than in the case of two-dimensional image perception. Analytic equations of three-dimensional microspace imaging by REM are obtained both behind and in front of the liquid crystal panel. Geometric distortions of a reproduced stereomodel of microobjects can be evaluated. A geometrically correct representation of three-dimensional characteristics of microobjects is possible only by reproducing pseudoscopic images which are observed in front of the liquid crystal panel. It is established that a potentially attainable threshold of the depth resolution of the stereoscopic REM depends on a microscope magnification factor, the number of pixels which are reproduced by a liquid crystal pane and an electron probe inclination angle. In practical applications the number of depth resolution planes reaches 25.

**Keywords:** raster electron microscope, representation of three-dimensional space, stereoeffect, stereoscopic model of microobjects, electronic probe, electron-optical deflection system, stereopair, liquid crystal panel, geometric distortions, depth resolution ability

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-1-94-106

### **REFERENCES**

1. Potaturkina-Nesterova N.I., Nemova I.S., Artamonova M.N., Gorel'nikova E.A., Kuyarov A.A., Potekhina L.P., Radaeva O.A., Samyshkina N.E. *Sovremennye metody mikroskopii v izuchenii biologicheskikh ob"ektov* [Modern microscopy techniques in the research of biological objects]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2012, no. 6, pp. 29–33.
2. Kuskova A.N., Zhigalina O.M., Mukhortov V.M. [Analysis of dislocation structure epitaxial films of titanium barium-strontium, are growed on base MgO with aid pictures Moire]. *Tezisy dokladov XXIV Rossiiskoi konferentsii po elektronnoi mikroskopii RKEM–2012*, 29 maya–1 iyunya 2012 g. [Proceedings of the XXIV Russian Conference on Electron Microscopy RCEM–2012], Chernogolovka, Moscow region, Russian Federation, May 29–June 1, 2012, pp. 36–37.

---

\* Received 2 Oktober 2014.

3. Yasnikov I.S., Nagornov Yu.S., Gorbachev I.V., Mikeev R.R., Sadovnikov P.S., Shubchinskaya N.Yu., Aminarov A.V. Skaniruyushchaya elektronnaya mikroskopiya kak metod izucheniya mikroskopicheskikh ob"ektov elektroliticheskogo proiskhozhdeniya [Scanning electron microscope as a method of studying microscopic objects of electrolytic origin]. *Fundamental'nye issledovaniya – Fundamental research*, 2013, no. 1–3, pp. 758–764.

4. Zhou W., Wang Z.L., eds. *Scanning microscopy for nanotechnology: techniques and applications*. Berlin, Springer Science; New York, Business Media, 2006. 522 p. (Russ. ed.: Zhu U., Uang Zh.L., eds. *Rastrovaya elektronnaya mikroskopiya dlya nanotekhnologii: metody i primeneniya*. Translated from English S.A. Ivanov, K.I. Domkin. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2013. 600 p.).

5. Kuskova A.N., Gainutdinov R.V., Zhigalina O.M., Mukhortov V.M. [Influence of thickness on domain structure of films Ba<sub>0.8</sub>Sr<sub>0.2</sub>TiO<sub>3</sub> on base MgO]. *Trudy XVIII Rossiiskogo simpoziuma po rastrovoi elektronnoi mikroskopii i analiticheskim metodam issledovaniya tverdykh tel (REM–2013), Chernogolovka, 3–7 iyunya 2013 g.* [Proceedings of the XVIII Russian Symposium on Scanning Electron Microscopy (SEM–2013)], Chernogolovka, Moscow region, Russian Federation, June 3–7, 2013, p. 384. (in Russian)

6. Kuskova A.N., Zhigalina O.M. [Investigations of boundary of division of heterostructure Ba(Sr)TiO<sub>3</sub>/MgO by method HAADF STEM]. *XXV Rossiiskaya konferentsiya po elektronnoi mikroskopii i 2-ya Shkola molodykh uchenykh «Sovremennyye metody elektronnoi i zondovoi mikroskopii v issledovaniyakh nanostruktur i nanomaterialov»: RKEM–2014, 2 iyunya–6 iyunya 2014 g.: tezisy dokladov* [Theses of reports of XXV Russian Conference on Electron Microscopy and 2nd School for Young Scientists "Modern methods of electron and scanning probe microscopy in the study of nanostructures and nanomaterials": RCEM–2014], Chernogolovka, Moscow region Russian Federation, 2nd Jun 2014–6th Jun 2014, vol. 1, pp. 30–31.

7. Lagar J.H., Raborar M.G.C. Material contrast identification and compositional contrast mapping using back scattered electron imaging. *Proceedings of 20th IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA)*, Suzhou, China, 15–19 July 2013, pp. 464–469. doi: 10.1109/IPFA.2013.6599201

8. Vasilyuk V., Goy V., Nakonechnyi M., Rehus A. Generator of signals of reamer in scan television microscope. *Proceedings of International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET 2012)*, Lviv, Ukraine, 21–24 February 2012, p. 157.

9. Scanning electron microscope: advantages and disadvantages in imaging components and applications. Available at: <http://www.microscopemaster.com/scanning-electron-microscope.html> (accessed 12.02.2015).

10. Swapp S. Scanning electron microscopy (SEM). *Geochemical Instrumentation and Analysis: browse collection*. Available at: [http://serc.carleton.edu/research\\_education/geochemsheets/techniques/SEM.html](http://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/SEM.html) (accessed 12.02.2015).

11. Yuan H., Calic J., Kondoz A. Quality of interaction experience in stereoscopic 3D TV. *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP 2014)*, Paris, France, 27–30 October 2014, pp. 748–752. doi: 10.1109/ICIP.2014.7025150

12. Cellatoglu A., Balasubramanian, K. Autostereoscopic imaging techniques for 3D TV: proposals for Improvements. *Journals of Display Technology*, 2013, vol. 9, iss. 8, pp. 666–672. doi: 10.1109/JDT.2013.2257983

13. Kwak Y., Lee S., Yang S. Crosstalk characterization method for stereoscopic three-dimensional television. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2012, vol. 58, iss. 4, pp. 1411–1415. doi: 10.1109/TCE.2012.6415014

14. Yuan H., Calic J., Fernando A., Kondoz A. Investigation and evaluation of pointing modalities for interactive stereoscopic 3D TV. *Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME 2013)*, San Jose, California, USA, 15–19 July 2013, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICME.2013.6607621

15. Boehs G., Vieira M.L.H. Stereoscopic image quality in virtual environments. *Proceedings of IEEE International Conference on 3D Imaging (IC3D 2014)*, Liege, Belgium, 9–10 December 2014, pp. 1–8. doi: 10.1109/IC3D.2014.7032573

16. 3D TV without Glasses! Autostereoscopic changes 3D TV. Available at: [revision3.com/hak5/autostereoscopic-tvs-ces/](http://revision3.com/hak5/autostereoscopic-tvs-ces/) (accessed 12.02.2015).

17. Stereoscopic television. *ITU publications*. Available at: [www.itu.int/pub/R-QUE-SG06.125/ru/](http://www.itu.int/pub/R-QUE-SG06.125/ru/) (accessed 12.02.2015).

18. Zeng M., Nguyen T. Crosstalk modeling, analysis, simulation and cancellation in passive-type stereoscopic LCD displays. *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2013)*, British Columbia, Canada, 26–31 May 2013, pp. 1840–1844. doi: 10.1109/ICASSP.2013.6637971

19. Chen C.P., Kim K.-H., Yoon T.-H., Kim J.C. A viewing angle switching panel using guest-host liquid crystal. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2009, vol. 48, no. 6R. Art. 062401. Available at: [iopscience.iop.org/1347-4065/48/6R/062401](http://iopscience.iop.org/1347-4065/48/6R/062401) (accessed 12.02.2015).

20. Wong K.T. The use of the liquid crystal display (LCD) panel as a teaching aid in medical lectures. *Medical Teacher*. 1992, vol. 14, no. 1, pp. 33–36. doi: 10.3109/01421599209044012. Available at: [www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1376854](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1376854) (accessed 12.02.2015).