

## АЭРОФОТОСЪЕМКА

УДК 528.72

В. Н. МЕЛЬНИК

### ОБЗОР РАБОТ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ФОТОГРАММЕТРИИ В ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Пространственное измерение объектов электронно-микроскопического порядка на протяжении многих лет является предметом научных исследований. Получение трехмерной количественной информации от микроскопических объектов имеет большое значение в кристаллографии, металлографии, биологии и медицине. Среди различных методов измерения микрообъектов особое место занимает микростереофотограмметрия, главные преимущества которой — универсальность, достаточно высокая точность, объективность.

Теоретически возможность стереоскопической съемки на электронном микроскопе была доказана в 1934 г. Руска. Первые опыты [7] по получению стереоснимков на электронном микроскопе были проведены в 1939—1940 гг. К этому времени относятся также и первые публикации [11] по фотограмметрической обработке электронно-микроскопических стереопар. Предполагая параллельно-перспективное отображение, Gotthardt [14] получил формулы для вычисления пространственных координат точек объекта. Почти одновременно и независимо точно такие же формулы получил Müller [35], хотя при выводе их он исходил из известного в фотограмметрии нормального случая съемки. В [35] выведены также формулы для определения глубин объекта по методу косоугоного напыления. Проведенное сравнение результатов определения глубин в шести точках двумя методами показало сходимость в пределах 1—15%.

Впервые на целесообразность применения стереоскопической съемки при изучении микрокристаллов указали советские ученые [5]. Они получили также большое количество стереопар хорошего качества. Уже первые опыты выявили ряд особенностей съемки и фотограмметрической обработки электронно-микроскопических стереопар. Во-первых, с геометрической точки зрения электронный пучок пронизывает образец не так, как оптический пучок света: его отображающие лучи не расходящиеся, а параллельные. Во-вторых, не может быть применен в электронной микроскопии нормальный случай съемки, так как только при конвергентной съемке точки, которые лежат в разных плоскостях, показывают разные параллаксы. В-третьих, работающие по законам центральной проекции универсальные фотограмметрические приборы (стереопланиграф, мультиплекс и др.) не могут быть использованы для обработки электронных микрографий, так как из-за невыполнения условия идентичности лучевых связей будут возникать недопустимые искажения стереомодели.

После выхода работ Gotthardt, Müller наступил длительный перерыв. Лишь начиная с 50-х годов, когда установилось сотрудничество института фотограмметрии Берлинского университета и научно-исследовательской группы микроморфологии (рук. Helmske), вопросы теории

и практики электронной микростереофотограмметрии стали разрабатываться более интенсивно [17, 18, 19, 20].

Так, в [18, 19] рассматривается выбор оптимальных условий при электронно-микроскопической стереосъемке. Устанавливается математическая зависимость между увеличением микроскопа, углом конвергенции, рельефом объекта и физиологическими особенностями стереозрения. Приведенные в [19] расчеты являются, однако, приближенными, так как они получены из применяемой в наземной фотограмметрии формулы Lüscher [32]. В [4] предлагается рассчитывать съемочные параметры при условии получения заранее заданной относительной ошибки измерений высот. В [19] при рассмотрении вопроса о влиянии различных источников ошибок на точность измерения высот точек объекта, авторы делают вывод, что главным источником являются погрешности в определении угла конвергенции. Впоследствии [12, 13] была доказана ошибочность этого утверждения.

В дискуссии по вопросу применения универсальных фотограмметрических приборов, развернувшейся между Gotthardt и Helmcke [15], указывается на неприменимость в электронной микростереофотограмметрии способа взаимного ориентирования аэрофотоснимков. Было установлено также, что универсальная обработка электронных микрографий (измерение пространственных координат, проведение горизонталей, вычерчивание профилей и т. д.) может быть выполнена только на принципиально новом стереоприборе. Детальное рассмотрение требований, которым должен отвечать подобный прибор, дано в [20]. Так, установлено, что кроме восстановления параллельной связки лучей, прибор дает возможность выравнить разномасштабность снимков стереопары и учесть поворот изображения. Эти требования вытекают из конструктивных особенностей электронных микроскопов. В [10] предлагается учитывать поворот изображения, поворачивая на стереоприборе снимки до достижения нулевого эффекта с последующим общим поворотом на  $90^\circ$ .

В соответствии с требованиями, изложенными в [20], и предложением, сделанным в [10], был создан в 1954—1955 гг. в институте фотограмметрии Берлинского университета универсальный стереоприбор — эльмиграф I [8]. На эльмиграфе I стереомодель восстанавливается в результате пересечения двух параллельных пучков. Это достигнуто использованием оригинально сконструированных проекционных систем. Выравнивание масштабов снимков стереопары осуществляется оптическим путем. Специальные приспособления служат для раздельного и совместного поворота снимков. Наличие последних приспособлений в значительной степени упрощает процесс ориентирования снимков, хотя и приводит к некоторому снижению точности результатов измерений. Методы и результаты измерений электронно-микроскопических стереосъемок при помощи эльмиграфа I были сообщены на IV Международном конгрессе по электронной микроскопии [23]. В частности, было указано, что только в результате измерений на эльмиграфе I можно изучить микроморфологию ряда биологических структур (например, Diatomeenschalen).

Пример определения на эльмиграфе I пространственных углов между гранями кристалла дан в [22]. Хотя в литературе [16, 22, 30, 33, 39] эльмиграф I расценивается как наиболее точный и универсальный прибор, тем не менее из-за высокой стоимости он не внедрен в серийное производство.

И. С. Гареликом [3] предложена принципиальная схема прибора для обработки стереопар, полученных на электронном микроскопе или длиннофокусными камерами. В этой схеме применяется новый способ построения подобных лучевых связок — с мнимым центром проекции.

Для этого автором предложены специальные коррекционные приспособления. Новым является также предложение создать для каждого снимка свою базисную каретку.

Наряду с высокоточной универсальной обработкой на специально созданных приборах при пониженных требованиях к точности электронные микрографы могут быть обработаны также при помощи использующихся в фотограмметрической практике стереорисующих приборов стереокомпараторного типа (стереометр, стереопрет, стереопантометр, стереотоп и др.).

Так, в [40] описана упрощенная методика трехмерной обработки (составление плана и проведение горизонталей) электронно-микроскопических стереопар при помощи стереопрета фирмы Цейсс-Аэрофотограф. Методика рассчитана на использование приближенных формул параллельного случая съемки без учета разномасштабности снимков и поворота изображения. По исследованиям авторов, при обработке стереопар, полученных на электростатическом микроскопе Цейсс EM-8 с общим увеличением 5000:1, максимальная относительная ошибка в плане составила  $\frac{1}{40}$ , а по высоте — около 5%. Надо полагать, что

в случае получения стереопар на электронном микроскопе электромагнитного типа результаты будут еще худшими.

В [9] сообщается о применении для графической обработки стереопар (вычерчивание плана и профилей) эльмитопа — модификации известного стереотопа фирмы Цейсс. Для этого в конструкцию стереотопа введены дополнительные устройства, позволяющие совместно и раздельно поворачивать снимки. Разномасштабность устраняется механическим путем при помощи специального корректора. Разработано профильное приспособление, автоматически вычерчивающее профильные сечения. По теории на эльмитопе обрабатывается лишь приближенная формула определения превышений, что снижает точность получаемых результатов. Однако главные преимущества эльмитопа перед эльмиграфом — простота в обращении, невысокая стоимость, портативность.

В [2] предлагается использовать для получения графического плана с горизонталями стереограф СД-1 конструкции проф. Дробышева. Для этого прибор немного изменяют. По методике автора нужно сначала вычислять установочные углы, а затем с помощью измерительных сеток наклонять на эти углы проектирующие рычаги. Кроме того, в процессе измерений необходимо устранять вертикальные параллаксы. Все это в некоторой степени усложняет обработку снимков.

По существу все рассмотренные выше приборы обрабатывают в той или иной мере формулы параллельного случая съемки. По разным причинам могут возникнуть отклонения от строго параллельной проекции.

Nankivell [13, 37] получил общее уравнение параллакса без допущения параллельной проекции. Анализ показал, что определяемые по формулам Gotthardt [14] превышения имеют ошибки за наклон и перспективу.

В 1960 г. Wells [45] предложил учитывать эти ошибки расчетом коэффициента разномасштабности и перспективных поправок. Предполагая центрально-перспективное отображение, он получил формулы для вычисления пространственных координат точек объекта. Исходя из последних, выведены формулы коэффициента разномасштабности и перспективных поправок. Позже Nankivell [37] показал, что расчетом коэффициента разномасштабности не исключается полностью ошибка наклона, хотя и ослабляется в значительной степени.

Выведенные из предположения центральной проекции формулы для вычисления пространственных координат точек объекта приведены также в [1, 38]. Идентичность этих формул доказана в [6].

Кроме обработки на стереорисующих приборах (эльмиграф, эльмитоп, преобразованный стереограф СД-1 и т. д.) в принципе можно обрабатывать электронные микрофотографии аналитическим путем.

На IX международном фотограмметрическом конгрессе (1960 г.) проф. Hubeny изложил в своем докладе [28] аналитический метод обработки. Аналитический способ включает: измерения на стереокомпараторе, взаимное и абсолютное ориентирование снимков стереопары, вычисление пространственных координат точек объекта. Hubeny предложил находить элементы взаимного ориентирования ( $\alpha_Z$ ,  $\alpha_R$ ,  $m$ ), как и в обычной фотограмметрии, на основе устранения поперечных параллаксов. Вывод соответствующих формул выполнен из предположения параллельной проекции и подробно изложен в [24, 25, 26].

Принципиально аналогичное решение задачи определения элементов взаимного ориентирования было дано в 1965 г. И. С. Гареликом [1]. При этом вывод необходимых формул, которые соответствующим выбором точек, на которых измеряются продольные и поперечные параллаксы, приводятся к очень простому виду, выполнен из предположения центральной проекции.

Основным недостатком аналитических способов определения элементов взаимного ориентирования является следующее.

В основе обоих способов лежит определение элементов взаимного ориентирования через измеренные поперечные параллаксы. При этом предполагается, что поперечные параллаксы вызываются неправильным ориентированием на стереокомпараторе снимков стереопары и их разномасштабностью.

Однако поперечные параллаксы могут вызываться и рядом других причин, как, например, изменением или движением объекта во время стереосъемки, дисторсией микроскопа, деформацией фотопластинки.

Эмпирические методы определения углов  $\alpha_Z$  и  $\alpha_R$ , как они изложены в [34, 35, 42, 43], недостаточно точные.

При фотограмметрической обработке электронно-микроскопических стереопар не нужно определять такие съемочные параметры, как угол конвергенции и увеличение. Инструментальное решение задачи определения угла конвергенции с точностью до нескольких минут обычно затруднительно. Поэтому было предложено ряд косвенных методов.

Так, Hubeny [27] предложил наносить на исследуемый образец кристаллы MgO, то есть кристаллы кубической сингонии. Известно, что для кристаллов MgO отношение диагоналей равно единице, а поэтому по полученному из измерений стереопар соотношению диагоналей можно определить угол конвергенции. Некоторые сведения о точности определения угла конвергенции данным методом сообщаются в [33].

На IV международном конгрессе по электронной микроскопии Grothe, Knobling и Schimmel [16] предложили наносить на образец полистирольные шарики известных размеров. Измерив диаметр шарика в плоскости  $xy$  и разность параллаксов наиболее высокой (низкой) его точек, можно определить угол конвергенции, так как размеры шарика вдоль трех координатных осей равны. Полистирольные шарики не просвечиваются и на фотопластинках отображаются белыми кругами. Поэтому затруднительно нанести стереоскопически измерительную марку на наиболее высокую (низкую) точку. Приготовлением с полистирольных шариков угольных реплик разрешается это затруднение, однако точность определения угла конвергенции при этом невысокая.

В [21, 29] описан метод определения угла конвергенции по дифракционной картине с линиями Кикучи. Метод основан на свойстве линий Кикучи занимать различное положение в зависимости от наклона образца, на поверхность которого нанесены кристаллы графита. По данным Kleinn [29], точность определения угла конвергенции этим методом со-

ставила  $\pm 2$ . Несмотря на высокую точность, метод не получил широкого применения по следующим причинам:

1. Только 5% кристаллов графита указывают линии Кикучи.
2. По исследованиям [21], метод неприменим к репликам и псевдо-репликам.

3. Применять этот метод можно на электронном микроскопе с напряжением пучка в 100 кВ и более.

Все три метода определения угла конвергенции предполагают нанесение на исследуемый образец соответствующих тестовых объектов (MgO, полистирол, кристаллы графита), что в общем выполняется не просто.

В литературе отсутствуют данные многосторонних исследований точности получения угла конвергенции каждым из трех методов: нет также данных исследований по выбору оптимального способа препарирования тестовых объектов. Поэтому эти вопросы нуждаются в дальнейшей разработке.

Нельзя считать окончательно решенным вопрос создания специального измерительного прибора, предназначенного для обработки электронных микрографий. Как известно, для достижения высокой точности фотограмметрических измерений необходимо отожествить конус лучей электронного микроскопа и оптический конус измерительного аппарата. Особенностью электронных микроскопов электромагнитного типа является то, что путь электронов имеет форму вращения в виде спирали. Такой пучок электронов нельзя восстановить оптическими линзами.

Электронные микроскопы просвечивающего типа позволяют исследовать массивные (непросвечивающие) образцы только косвенным методом — методом реплик. Следует полагать, что вызванные процессом препарирования деформации объекта съемки могут колебаться в широких пределах (за исключением [40] в литературе нет данных исследований этого вопроса).

Поскольку тестовые объекты трудно приготовить, отсутствуют специально поставленные эксперименты по определению абсолютной точности измерений электронных микрографий фотограмметрическим методом.

Нет также исследований по определению дисторсии, хотя нужно полагать, что электронно-микроскопическое изображение не свободно от дисторсионных искажений.

Таким образом, вопрос применения фотограмметрического метода в электронной микроскопии нельзя считать окончательно разрешенным, в особенности для отечественной практики, где этот метод используется еще крайне редко.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гарелик И. С. Теория обработки стереопар, полученных на электронном микроскопе. — «Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка», 1965, вып. 4.
2. Гарелик И. С. Применение стереографа СД-1 для обработки стереопар электронной микроскопии. — «Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка», 1966, вып. 5.
3. Гарелик И. С. Принципиальная схема прибора для обработки стереопар, снятых длиннофокусными камерами. — «Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка», 1969, вып. 4.
4. Гарелик И. С. Стереофотограмметрическая съемка в электронной микроскопии. Автореферат канд. дис., 1967.
5. Грицаенко Г. С., Горшков А. И., Рудницкая. Электронная микроскопия минералов, М., Изд-во АН СССР, 1961.
6. Мельник В. Н. Львов, 1973, № 7.
7. Ardenne V. M. Naturwissenschaften, Berlin, 28, 1940, 16, 248.
8. Burkhardt R. Optik, Stuttgart, 12 (1955), 9, 417.
9. Burkhardt R. Internat. Archiv für Photogrammetrie. XV, 6, Lissabon, 1965.
10. Burkhardt R. Helmecke J. Proceedings of International Conference on Electron Microscopy. London, 1954.

11. Eitel W., Gotthardt E. *Naturwissenschaften* Berlin, 28, 1940, 23, 367.
12. Garrod R., Nankivell J. F. *Brit. J. Appl. Phys.*, 1958, 9, 214.
13. Garrod R., Nankivell J. *Optik*, 16, 1959, 1, 27.
14. Gotthardt E. *Z. Phys.* Berlin 1941—1942, 714.
15. Gotthardt E., Helmcke J., Richter H. *Z. f. wiss. Mikroskopie*, Stuttgart 61, 1953, 4, 249.
16. Grothe H., Knobling E., Schimmel G., 4. Internationaler Kongreß f. Elektronenmikroskopie, Berlin, 1958.
17. Helmcke J., Richter H. *Allg. Vermessungs. — Nachr.* Berlin—Wilm, 58, 1951, 6, 142.
18. Helmcke J. *Optik*, Stuttgart 11, 1954, 5, 201.
19. Helmcke J., Ortman H. *Optik*, Stuttgart, 11, 1954, 12, 562.
20. Helmcke J. *Optik*, Stuttgart, 12, 1955, 6, 253.
21. Helmcke J., Kleinn W., Burkhardt R. *Photogramm. Engng.* 1965, 796.
22. Helmcke J. *Laboratory Investigation* 14, 1965, 6, 195.
23. Helmcke J., Weimann G. 4. Internationaler Kongreß f. Elektronenmikroskopie, Berlin, 1958.
24. Hubeny K. *Photographische Korrespondenz* 95, 1959, 5, 72.
25. Hubeny K. *Photographische Korrespondenz* 96, 1960, 4, 51.
26. Hubeny K. *Bildmess. n. Luftbildwesen.* 3, 1960, 182.
27. Hubeny K. *Radex Rundschau* 5, 1960, 421.
28. Hubeny K. *Photogrammetria* XVI, 1959—1960, 2, 118.
29. Kleinn W., *Optik*, Stuttgart, 18, 1961, 5, 209.
30. Киров. *Доклады Болг. АН.* т. 21, № 5, 1968.
31. Lasmann. *Die Anwendung der Photogrammetrie auf nichttopographischen Gebieten*, Leipzig, 1950.
32. Lüscher H. *Photoindustrie und-handel*, 1944, H. 7—8.
33. Menz J. *Feingerätetechnik*, Berlin 14, 1965, 11, 488.
34. Miller R., Sharpe J. *J. of Applied Physics*, 27, 1956, 8, 860.
35. Müller H. *Kolloid. Zeitschrift*, 99, 1942, 1, 6.
36. Nankivell J. F. *Brit. J. Appl. Phys.*, 1962, v. 13.
37. Nankivell J. F. *Optik*, Stuttgart, 20, 1963, 4, 171.
38. Nankivell J. F. *Optik*, Stuttgart 23, 1965—1966, 6, 505.
39. Pohlmann G. 4. Internationaler Kongreß f. Elektronenmikroskopie, Berlin, 1958.
40. Pohlmann G., Ahrend M. *Optik* 16, 1959, 8, 461.
41. Reimer L. Schulte Chr. *Naturwissenschaften* 55, 1968, 4, 164.
42. Robertson D., Eyre B., Maher D. *J. of Scientific Instruments*, 1968, 1, 851.
43. Rühle R., *Optik*, Stuttgart, 5, 1949, 8/9, 534.
44. Weimann G., *Allg. Vermess. — Nachr.* 9, 1970.
45. Wells O. C. *Brit. J. Appl. Phys.* 199, 1960, 11.

Работа поступила 22 декабря 1972 года.  
Рекомендована кафедрой аэрофотогеодезии  
Львовского политехнического института.