

дифракционной эффективности для различных циркуляций излучения (рис. 2), что можно объяснить эффектом „самоусиления“ при брэгговском считывании голограмм [7]. Характерные времена считывания составляли $\tau_+ \approx 0.28$ с, $\tau_- \approx 0.32$ с.

Проведенные эксперименты позволили обнаружить влияние эффекта голографической электрогирации на энергообмен и дифракционную эффективность циркулярно-поляризованных волн при самодифракции в кристалле ВТО, что может быть использовано для оптимизации схем динамической голографии.

В заключение выражаем глубокую признательность сотрудникам ЛФТИ за предоставление кристалла ВТО.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Петров М.П., Степанов С.С., Хоменко А.П. Фоточувствительные электрооптические среды в голографии и оптической обработке информации. Л.: Наука, 1983. с. 269.
- [2] Kukhtarov N., Pavlik B. and Semenovets T. // Phys. Stat. Sol. (a). 1986. V. 94. P. 623-633.
- [3] Кухтарев Н.В., Муравьев В.В., Семеновец Т.И. // Препринт ИФ АН УССР. 1986. № 19. С. 22.
- [4] Kukhtarov N.V. // Topics in Appl. Phys. 1988. V. 61. Photorefr. Materials and Their Applications I, Fundamental Phenomena. P. 99-129.
- [5] Влох О.Г., Желудев И.С. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1975. Т. 41. № 3. С. 470-477.
- [6] Fox A.J., Bruton T.M. // Appl. Phys. Lett. 1975. V. 27. N 6. P. 361-363.
- [7] Кухтарев Н.В. // Укр. физ. журн. 1978. Т. 23. № 12. С. 1947.

Поступило в Редакцию
10 ноября 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 4
07; 12

26 февраля 1989 г.

РЕГИСТРАЦИЯ СУБМИКРОННЫХ СТРУКТУР НА ЛАЗЕРНОМ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

В.П. Тычинский, И.Н. Мазалов,
В.Л. Панков, Д.В. Ублинский

Целый ряд практических задач, в частности переход к субмикронным размерам в интегральной технологии, в последнее время потребовал создания методов контроля, обеспечивающих разрешение по вы-

соте до единиц ангстрем при пространственном разрешении $1 - 0.05$ мкм. Существующие же устройства имеют ряд серьезных недостатков; например, растровые электронные микроскопы при высоком пространственном разрешении не дают прямого отсчета высоты, критичны к материалу объекта. Это стимулировало развитие нетрадиционных оптических методов контроля и привело к появлению особого класса интерференционных микроскопов, которые можно назвать „компьютерными фазовыми микроскопами“ (КФМ) [1, 2]. Их характерным признаком является использование микро-ЭВМ для восстановления фазового рельефа объекта путем анализа интерференционной картины.

В данной работе сообщается о результатах измерений топологических элементов с субмикронным разрешением на КФМ по оптической схеме Линника (см. [2]). Оптическая часть установки представляла собой модернизированный микроинтерферометр МИИ-4. В качестве источника излучения использовался гелий-неоновый лазер $\lambda=0.63$ мкм, $P \sim 1$ мВт. Интерференционная картина регистрировалась сканирующим фотоприемником - диссектором. Управление процессом измерений и обработка данных производилась микро-ЭВМ „Электроника - 60“ с матричным процессором МТ-70 [3].

Основные параметры установки: размер кадра: от 1.5×1.5 мкм до 80×80 мкм, дискретность отображения - 64×64 элемента (пиксела), разрешение на высоте 50 \AA .

Абсолютный масштаб в поле зрения КФМ определялся с помощью нарезной дифракционной решетки с шагом 1 мкм. Естественным масштабом при измерении высоты профиля является интерференционная полоса (в нашем случае $\lambda/2=0.314$ мкм), и точность измерений определяется отношением сигнал/шум, а также вкладом спеклов в интерференционную картину.

В качестве примера восстановления трехмерного рельефа объекта на рис. 1 показан участок топологического элемента интегральной схемы - выступ в форме параллелепипеда из Si_3N_4 на слое SiO_2 . Размеры элемента, измеренные независимым способом: высота $h_0=0.16 \pm 0.01$ мкм, ширина $l_0=0.9 \pm 0.05$ мкм. Соответствующие величины, полученные в результате измерений на КФМ: $h=0.15 \pm 0.01$ мкм, $l=0.9 \pm 0.01$ мкм.

В простом случае измерения прозрачной пленки толщиной h и показателем преломления n , расположенной на идеально отражающей поверхности, КФМ определяет „условную“ высоту H , связанную с истинной соотношением $H=(n-1)h$. Для приведенного выше примера для Si_3N_4 $n=2$ ($\lambda=0.63$ мкм) и $H=h$, т.е. условная высота совпадает с истинной.

Математическое обеспечение КФМ [3] позволяет также получать сечения пространственных изображений (т.е. профили объекта), пример которого приведен на рис. 1, по любому направлению в произвольной точке образца, определяемой оператором в интерактивном режиме. Примеры подобных сечений приведены на рис. 2.

На рис. 2, а показан профиль сечения образцовой меры шероховатости (ОМШ-М4-1.5 У.4.2 ГОСТ 2789-73) - канавки треуголь-

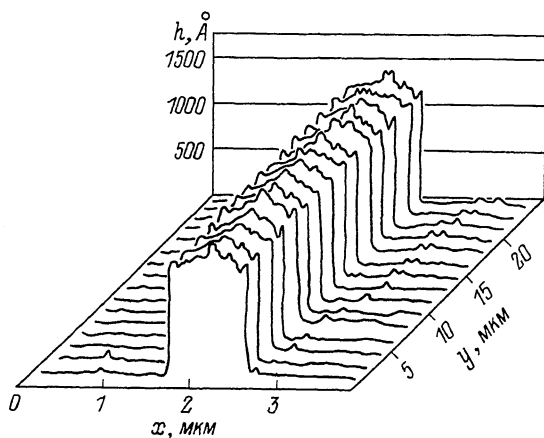


Рис. 1. Стереопроекция полупроводниковой структуры – выступ из Si_3N_4 на подслое SiO_2 . Номинальная высота 0,16 мкм, ширина 0,9 мкм.

ной формы с номинальной глубиной $1,5 \pm 0,15$ мкм. Измеренная в данной точке глубина составила $1,417 \pm 0,005$ мкм (штатный объектив МИИ-4 $30\times$) при хорошем воспроизведении формы образца.

Данный пример демонстрирует также возможность измерения высот, больших $\lambda/2$ с правильным восстановлением формы объекта.

На рис. 2, б приведен профиль щели в слое Si_3N_4 на окиси кремния SiO_2 (объектив $90\times$ с иммерсией) соответственно: $l = 0,375 \pm 0,023$ мкм, $h = 0,15 \pm 0,005$ мкм. Пунктиром показан идеализированный профиль канавки, указаны ее номинальные размеры ($h_0 = 0,16$ мкм, $l_0 = 0,4$ мкм). В данном случае, как уже было отмечено выше, измеренная высота также совпадает с истинной. Следует обратить внимание, что несмотря на искажения формы и осцилляции вызванные, по-видимому, дифракцией, высокая крутизна стенок позволила определить ширину щели с точностью до одного пиксела – 0,023 мкм.

Аналогичные результаты были получены и на других материалах и структурах (фоторезистах, пленках хрома, арсенида галлия и т.д.). Однако при работе с более сложными, в частности слоистыми, структурами, пересчет измеряемой фазы на высоту профиля предполагает наличие априорной информации о показателе преломления.

Возможности КФМ не ограничиваются приведенными выше примерами. С его помощью были проведены измерения динамики испарения пленки этилового спирта, исследования процесса деформации поверхности транзистора в интегральной схеме при пропускании через р-п-переход импульсов тока.

Приведенные экспериментальные результаты показывают, что с помощью компьютерного фазового микроскопа может быть получена количественная информация о микрогеометрии поверхности, ее струк-

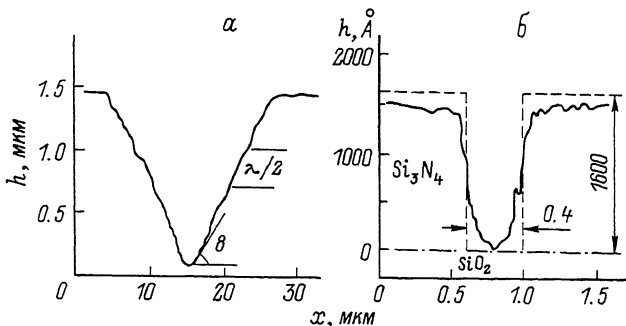


Рис. 2. Примеры профилей сечений объектов: а) профиль сечения образцовой меры шероховатости, объектив $30\times$, номинальная глубина 1.5 ± 0.15 мкм; б) профиль полупроводниковой структуры – шель в слое Si_3N_4 на подслое SiO_2 , объектив $90\times$ с иммерсией, пунктир – идеализированный профиль с номинальными размерами.

туре, толщине слоев, что имеет большое практическое значение в современной технологии и научных исследованиях.

Важной особенностью КФМ является то, что в нем восстановление трехмерного изображения объекта производится по фазовому, а не по амплитудному рельефу, как в обычном микроскопе. Это позволяет при высоком отношении сигнал/шум и соответствующем алгоритме обработки получить пространственное разрешение, превышающее релейевский предел, определяемый именно по амплитудному контрасту. По мнению авторов, у рассмотренной схемы КФМ еще имеются технические резервы для заметного увеличения точности определения координат фазовых объектов. Использование более современной вычислительной техники, а также улучшение параметров интерференционного микроскопа позволит увеличить предел измерений по полю до $0.005-0.1$ мкм и значительно повысить информативность КФМ.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] В h u s h a m В., W y a n t J.C., К o l i o p o u l o s С.L. // Appl. Opt. 1985. V. 24. N 10. P. 1489-1497.
- [2] М а з а л о в И.Н., С а м с о н о в К.Б., Т ы ч и н с к и й В.П. // Электронная промышленность. 1987. № 5. С. 54-55.
- [3] Е в д о к и м о в М.В., М а з а л о в И.Н. // Микропроцессорные средства и системы. 1988. № 2. С. 90.

Московский институт
радиотехники, электроники
и автоматики

Поступило в Редакцию
8 декабря 1988 г.