

К.68

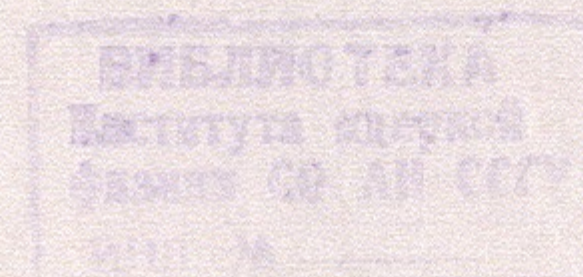
8

И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР
И Н С Т И Т У Т
АВТОМАТИКИ И ЭЛЕКТРОМЕТРИИ СО АН СССР

ПРЕПРИНТ И ЯФ 77-10

В.П.Коронкевич, Г.Н.Кулипанов, В.И.Наливайко,
В.Ф.Пиндюрин, А.Н.Скринский

КОНТАКТНОЕ ПРОЕЦИРОВАНИЕ МИКРООБЪЕКТОВ
РЕНТГЕНОВСКИМ СИНХРОТРОННЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ



Новосибирск

1977

КОНТАКТНОЕ ПРОЕЦИРОВАНИЕ МИКРООБЪЕКТОВ РЕНТГЕНОВСКИМ
СИНХРОТРОНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

В.П.Коронкевич, Г.Н.Кулипанов, В.И.Наливайко,
В.Ф.Пиндюрин, А.Н.Скринский

А н н о т а ц и я

Представлены результаты исследования халькогенидных стеклообразных материалов в качестве рентгеновской регистрирующей среды. Большие изменения показателя преломления под действием рентгеновского излучения позволили использовать халькогенидные материалы для получения фазовых изображений микрообъектов контактным методом. При сравнительно больших расстояниях микрообъект-регистратор (до 10 мм) размытие элементов изображения не превышало 0,5 мкм. Качество регистрируемого изображения контролировалось в реальном времени по дифракционной картине в видимом диапазоне спектра.

КОНТАКТНОЕ ПРОЕЦИРОВАНИЕ МИКРООБЪЕКТОВ РЕНТГЕНОВСКИМ СИНХРОТРОНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Высокая яркость синхротронного излучения (СИ) электронных накопителей /^{1,2}/ в широком диапазоне спектра (от 1 до 1000 Å) позволяет использовать это излучение для получения изображений микрообъектов контактным методом. В контактной микроскопии необходимо использование высокоразрешающих регистрирующих материалов /³/, которые, как правило, обладают низкой чувствительностью. Большие времена экспозиции ограничивают использование таких материалов при работе с обычными рентгеновскими источниками. Применение рентгеновского синхротронного излучения позволяет существенно сократить времена экспозиции и повысить предельное пространственное разрешение метода при работе со сравнительно большим расстоянием объект - регистратор.

Перспективными материалами для контактной микроскопии являются халькогенидные стеклообразные полупроводники. В предлагаемой работе проведены исследования этих материалов в качестве рентгеновской регистрирующей среды и представлены результаты контактного проектирования на них тестовых микрообъектов рентгеновским синхротронным излучением.

Изменение оптических свойств халькогенидных полупроводников при экспонировании рентгеновским излучением

Известно, что под действием оптического излучения в халькогенидных материалах изменение показателя преломления (Δn) достигает величины порядка 0,1 (на $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$) /⁴/. Большие значения Δn обеспечивают получение фазового рельефа с амплитудой более 2π для излучения в оптическом диапазоне при толщине пленок 5 + 10 мкм. Высокая разрешающая способность халькогенидных стекол (свыше 5000 лин/мм) дает возможность передавать тонкую структуру объекта. Халькогенидные материалы не требуют проявления и позволяют осуществлять оптический контроль качества регистрируемого

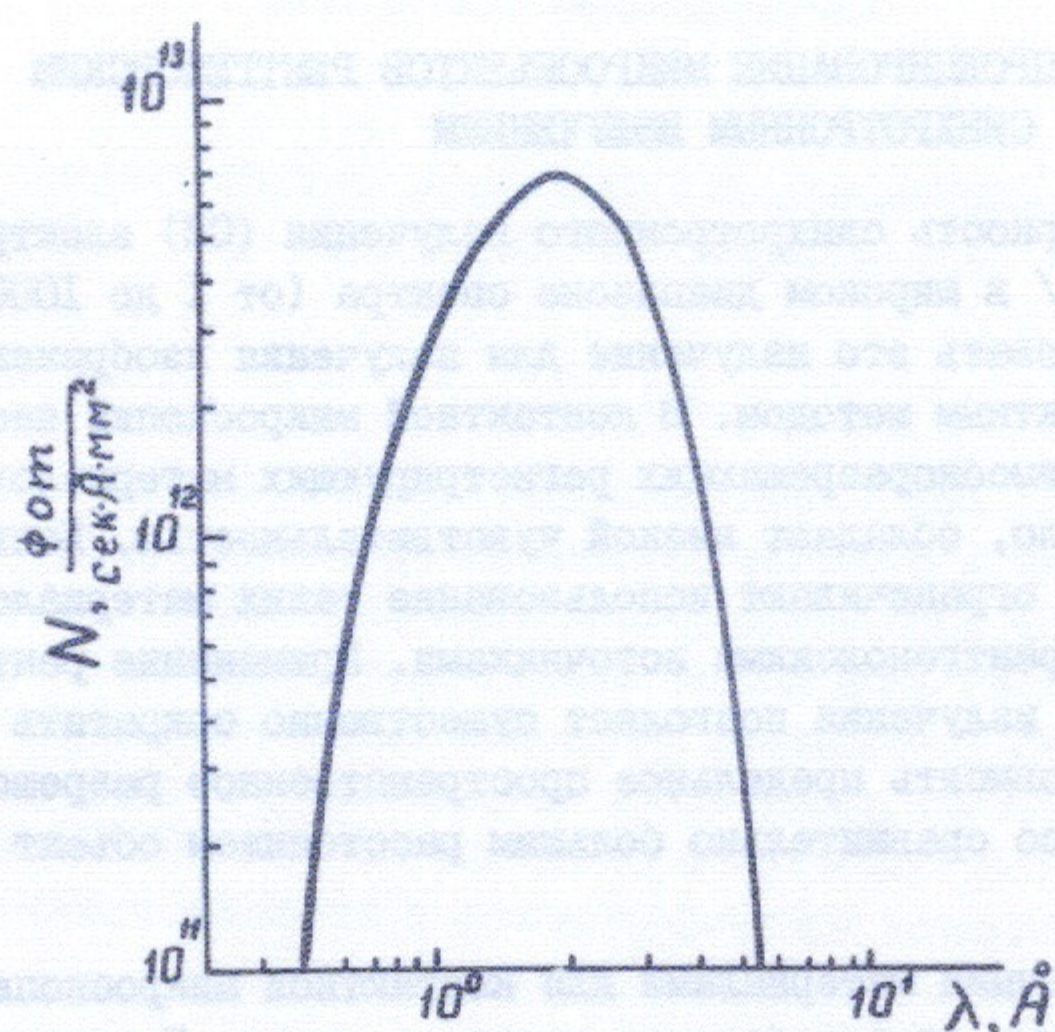


Рис.1. Спектр синхротронного излучения при энергии электронов 2 ГэВ.

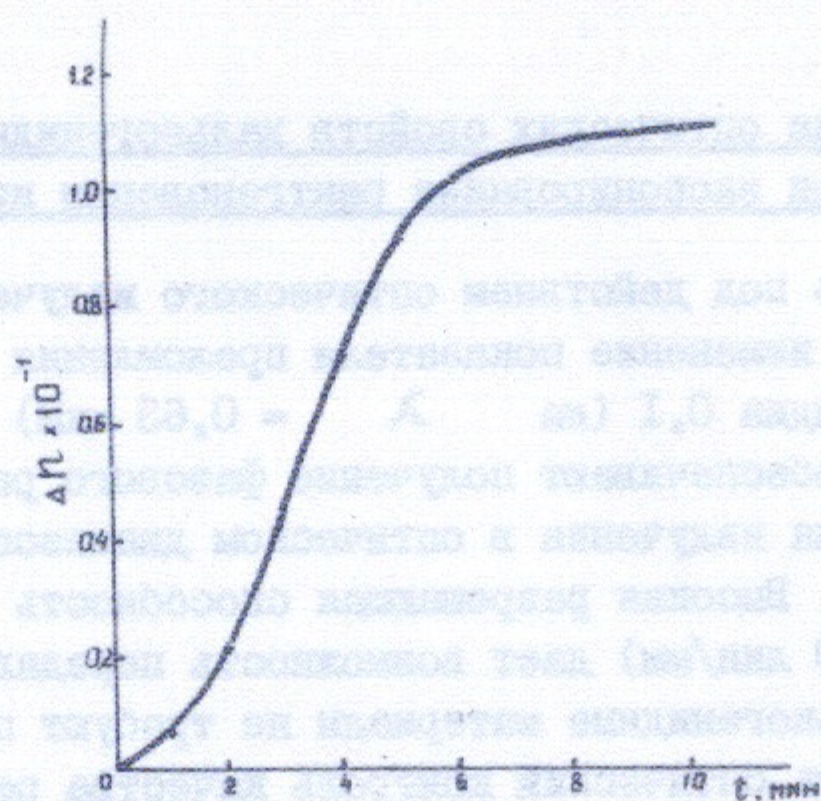


Рис.2. Зависимость изменения показателя преломления (на $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$) от времени экспозиции рентгеновским излучением в пленке As_2S_3 . $N = 10^{13} \frac{\text{фот}}{\text{сек} \cdot \text{мм}^2}$.

изображения в процессе экспонирования.

В работе исследовалось воздействие рентгеновского излучения на халькогенидные пленки толщиной 5 – 20 мкм, полученные электронно-лучевым напылением в вакууме на подложки из лавсана, фтористого бария и оксидного стекла, а также на полированные пластины из синтезированного халькогенидного материала. В эксперименте использовалось синхротронное излучение накопителя ВЭШ-3 /⁵/, работающего при энергии электронов $E = 2 \text{ ГэВ}$ и токе пучка $I_e = 50 \text{ мА}$. Экспонирование проводилось немонахроматизированным излучением с $\lambda = (0,5 + 5) \text{ Å}$ (рис.1). С длинноволновой стороны спектр обрезался за счет поглощения в бериллиевых фольгах выходного окна канала СИ (суммарная толщина фольги 0,4 мм), а с коротковолновой – энергией частиц в накопителе. Эксперименты проводились на расстоянии $L_s = 10 \text{ М}$ от точки излучения; плотность потока фотонов составляла $N = 10^{13} \frac{\text{фот}}{\text{сек} \cdot \text{мм}^2}$.

При экспонировании халькогенидных пленок рентгеновским излучением оказалось, что изменение их оптических свойств подобно изменениям, происходящим при воздействии светового излучения. Это подтверждается характером поведения кривой изменения показателя преломления n от времени экспозиции и положительным знаком производной $\frac{dn}{dt}$ (рис.2). При этом для получения одинаковых Δn в условиях облучения светом или рентгеновским излучением требуются приблизительно равные плотности поглощенной энергии. Результаты использования методики химического травления халькогенидных пленок в растворах щелочей /⁶/ показали, что скорость травления экспонированных рентгеновским излучением участков пленки уменьшается по сравнению с неэкспонированными участками (рис.3). Это также указывает на подобие фотоструктурных превращений в пленках при облучении оптическим и рентгеновским излучением.

Экспонирование СИ тонких пленок на подложках сопровождалось изменением оптических свойств не только халькогенидных материалов, но и материала подложки. Так, в случае использования подложек из оксидного стекла в результате облучения происходило значительное увеличение его оптической плотности, восстанавливавшейся до первоначального значения в процессе экспонирования.

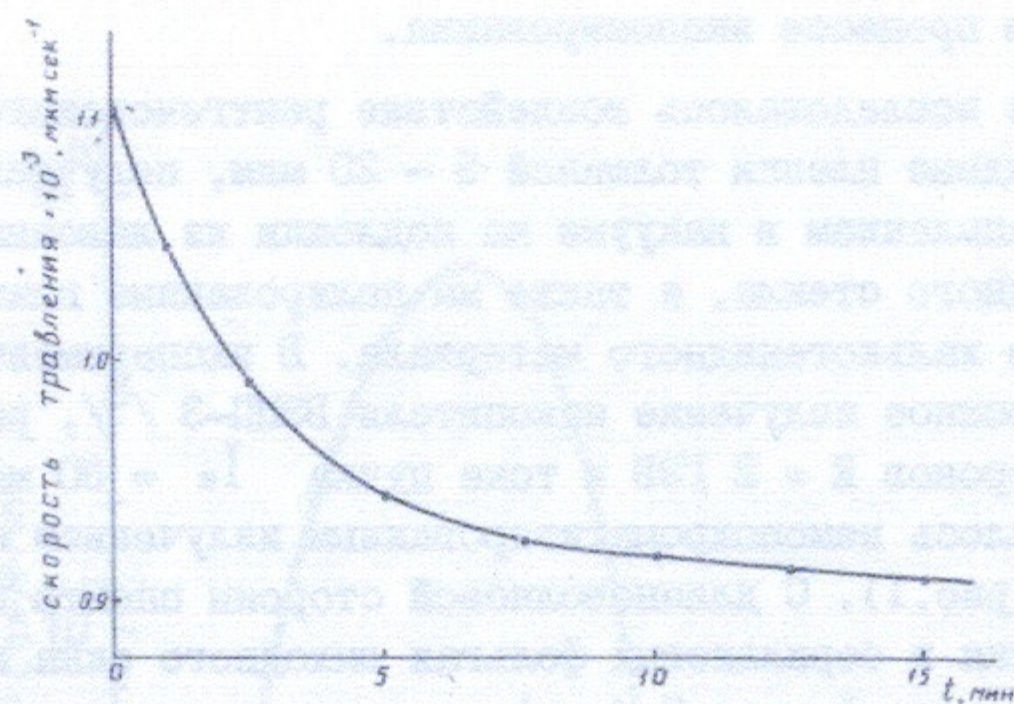


Рис.3. Изменение скорости травления пленок As_2S_3 в 0,02N растворе $NaOH$ от времени экспонирования.

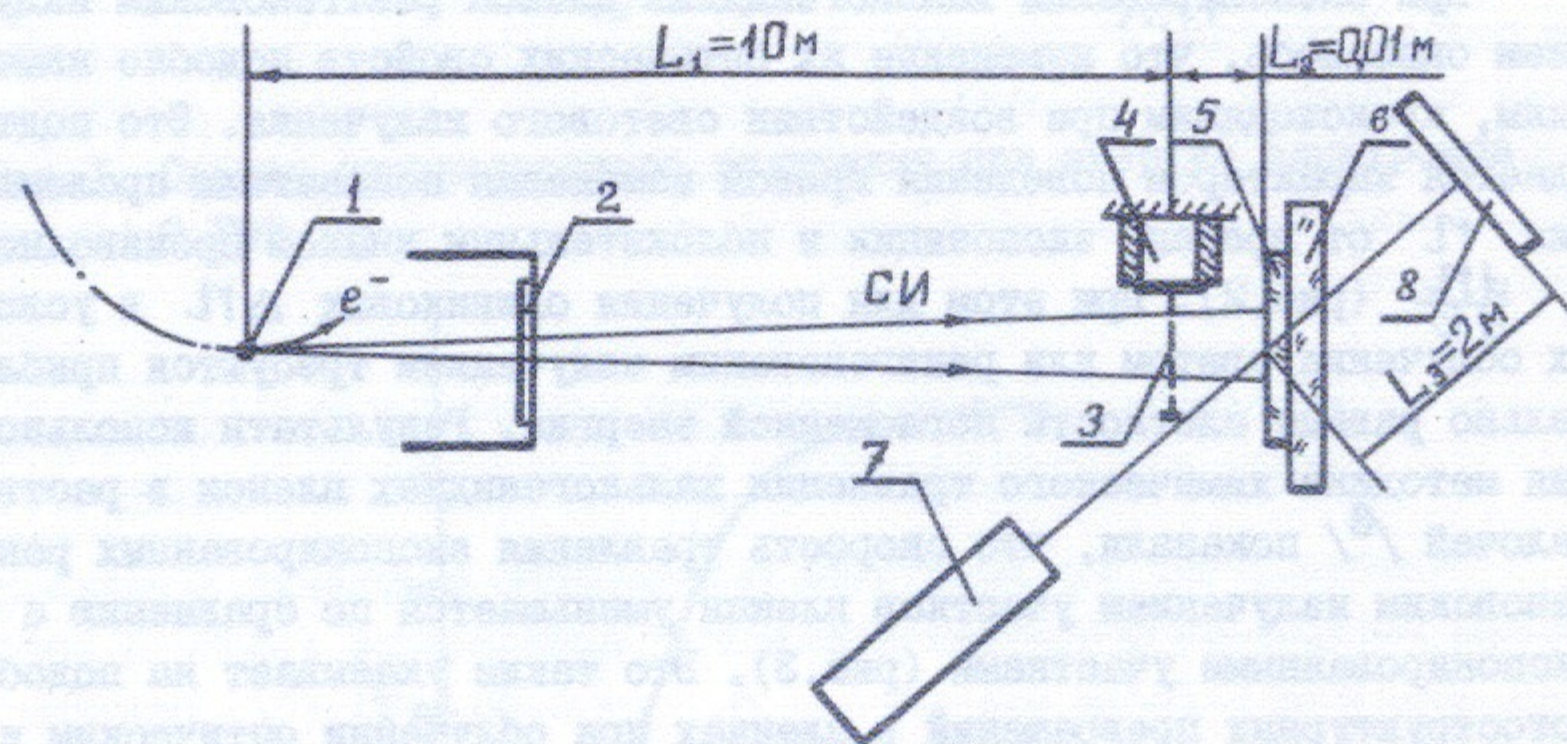


Рис.4. Схема проецирования и контроля: 1 - точка излучения; 2 - бериллиевая фольга; 3 - тест-объект; 4 - пьезоэлемент; 5 - халькогенидная пленка; 6 - подложка; 7 - He-Ne лазер; 8 - экран.

чального значения при последующем отжиге подложки в области температур выше $100^{\circ}C$. Фазовые изменения в подложке на $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$ были незначительными.

Рентгеновская контактная микроскопия

Наличие яркого источника рентгеновского СИ, а также результаты исследования воздействия его излучения на халькогенидные стеклообразные полупроводники позволили осуществить контролируемое в реальном времени контактное проецирование с высоким пространственным разрешением.

Схема эксперимента приведена на рис.4. В качестве тест-объекта для проецирования выбрана никелевая сетка, шаг сетки 30 мкм , ширина нитей и их толщина - 7 мкм (рис.5, а). Контрастность объекта была не хуже 0,4 на $\lambda = 1 \text{ \AA}$ и не хуже 0,7 на $\lambda = 3 \text{ \AA}$. Эксперимент проводился непосредственно в атмосфере. Расстояние образец - регистратор L_2 изменялось от 1 до 40 мм. Контроль качества регистрируемого изображения и выбор экспозиции осуществлялся в процессе экспонирования. Для этой цели в область экспонирования пленок направляли лазерный пучок ($\lambda = 0,63 \text{ мкм}$) и в дальней зоне на экране возникала дифракционная картина Фраунгофера (рис.6, а). При достижении оптимальных яркости и контраста этой картины облучение пленки прекращалось. Для получения хорошего контраста изображения тест-объекта требовались времена экспозиции 3 + 5 мин. Время экспозиции уменьшалось до нескольких секунд в случае, если пленка при экспонировании нагревалась до температуры порядка $100 - 150^{\circ}C$.

Минимальные размеры (X) деталей, которые могут быть разрешены данным методом, определялись разрешением пленки (δ_p), дифракцией излучения с длиной волны λ на деталях объекта, расстояниями L_1 и L_2 и геометрическими размерами источника излучения $\Delta_{x,y}$ (в нашем случае размеры электронного пучка в точке излучения: $\Delta_x = 1,5 \text{ мм}$; $\Delta_y = 0,15 \text{ мм}$)

$$X = \left(\delta_p + \lambda L_2 + \frac{\Delta_{x,y}^2 \cdot L_2^2}{L_1^2} \right)^{1/2}$$

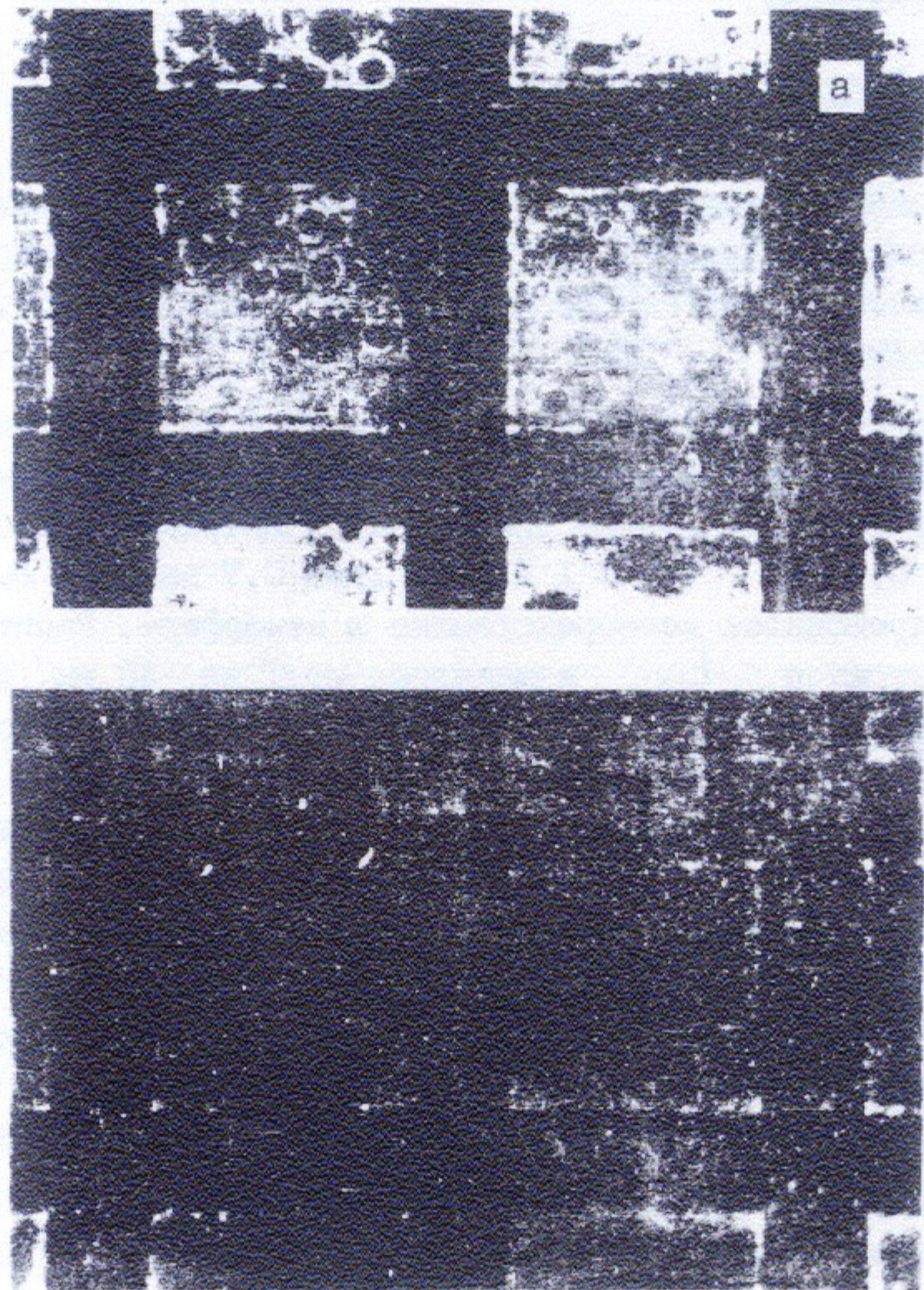


Рис.5. Тестовая решетка: а - изображение оригинала; б - фазовая решетка в халькогенидной пленке, наблюдаемая методом фазового контраста.

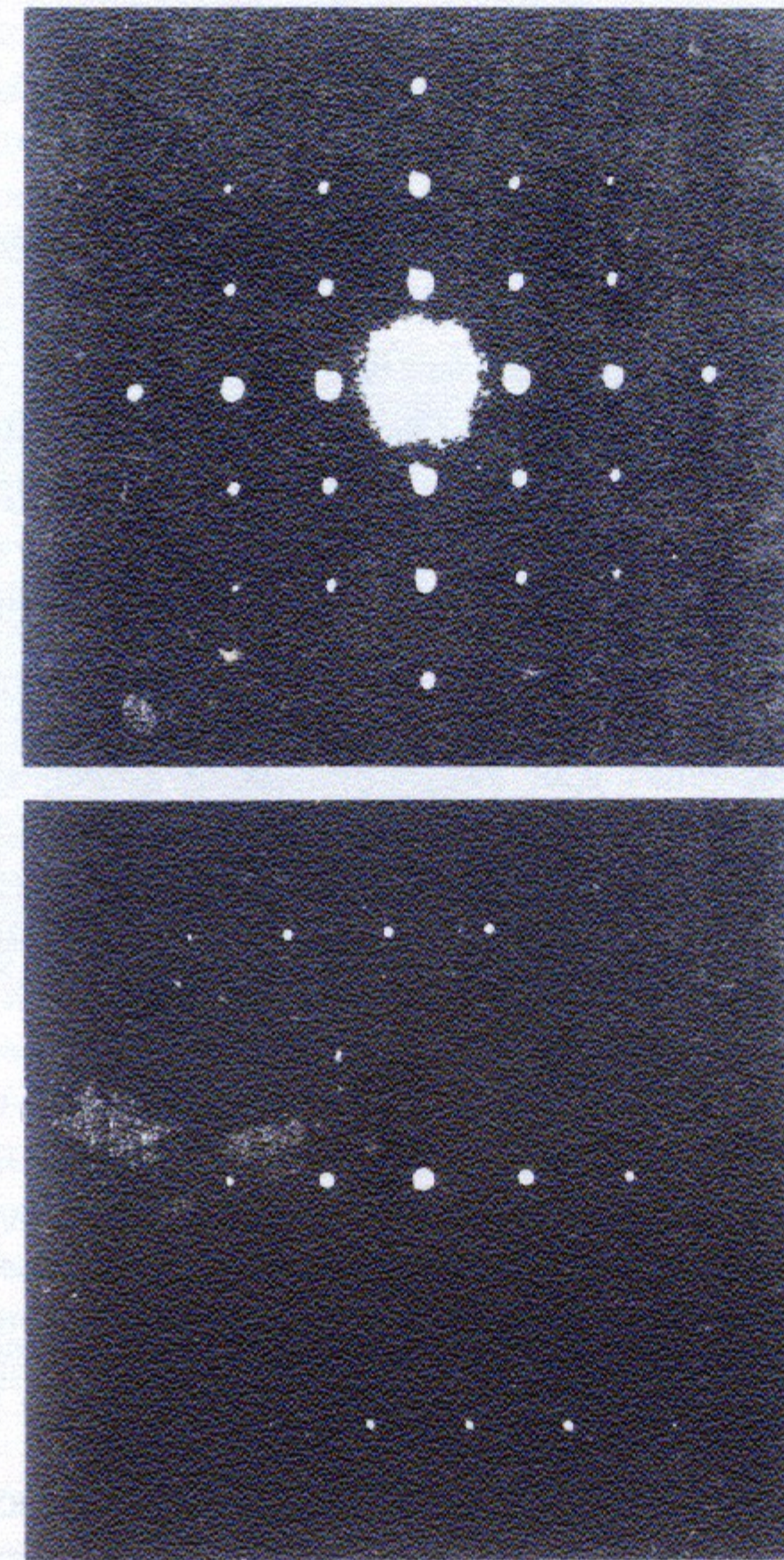


Рис.6. Дифракция Фраунгофера от фазовой решетки в халькогенидной пленке, полученной проецированием тест-объекта рентгеновским излучением: а - без сдвига; б - со сдвигом на половину периода.

При наших условиях эксперимента для $L_2 \leq 10$ мм размытие элементов изображения в плоскости регистратора должно было составлять менее 1 мкм по обеим координатам. На рис.5,6 приведено увеличенное изображение фазовой решетки, полученное этим методом в халькогенидной пленке на основе трисульфида мышьяка. Изображение решетки наблюдалось в микроскопе методом фазового контраста. Размытие элементов решетки действительно не превышало 0,5 мкм.

Изменение фазы прошедшего света в экспонированных участках халькогенидной пленки за счет увеличения показателя преломления составило величину, равную π , когда яркость дифракционной картины достигала максимума. Контроль фазы осуществлялся на ширинг-интерферометре (рис.7) /7/.

Методом двойной экспозиции оказалось возможным удвоить пространственную частоту решетки. Для этого никелевая сетка после первой экспозиции смещалась пьезоэлементом (см.рис.4) по одной из координат на половину своего периода и проводилась вторая экспозиция. Одновременно наблюдалось изменение дифракционной картины Фраунгофера, по которой можно было судить о точности смещения тест-объекта. Конечная картина дифракции на такой решетке приведена на рис.6,б. Видно, что в результате удвоения пространственной частоты фазовой решетки по одной из координат увеличилось вдвое расстояние между дифракционными максимумами. Такой способ многократной последовательной экспозиции может быть использован для получения решеток с пространственным периодом, меньшим длины волны излучения, используемого для считывания (порядка 0,1 мкм) для проверки принципа пространственного гетеродина /8/.

Первые результаты по регистрации рентгеновских изображений в халькогенидных материалах позволяют сделать выводы о перспективности использования синхротронного излучения для проецирования на них микрообъектов с высокими пространственными частотами. Переход к записи сигнала рентгеновским излучением с последующим восстановлением в видимом свете, например, методом пространственного гетеродина, приведет к увеличению плотности записи оптической информации при значительном увеличении ее емкости. Весьма перспективным

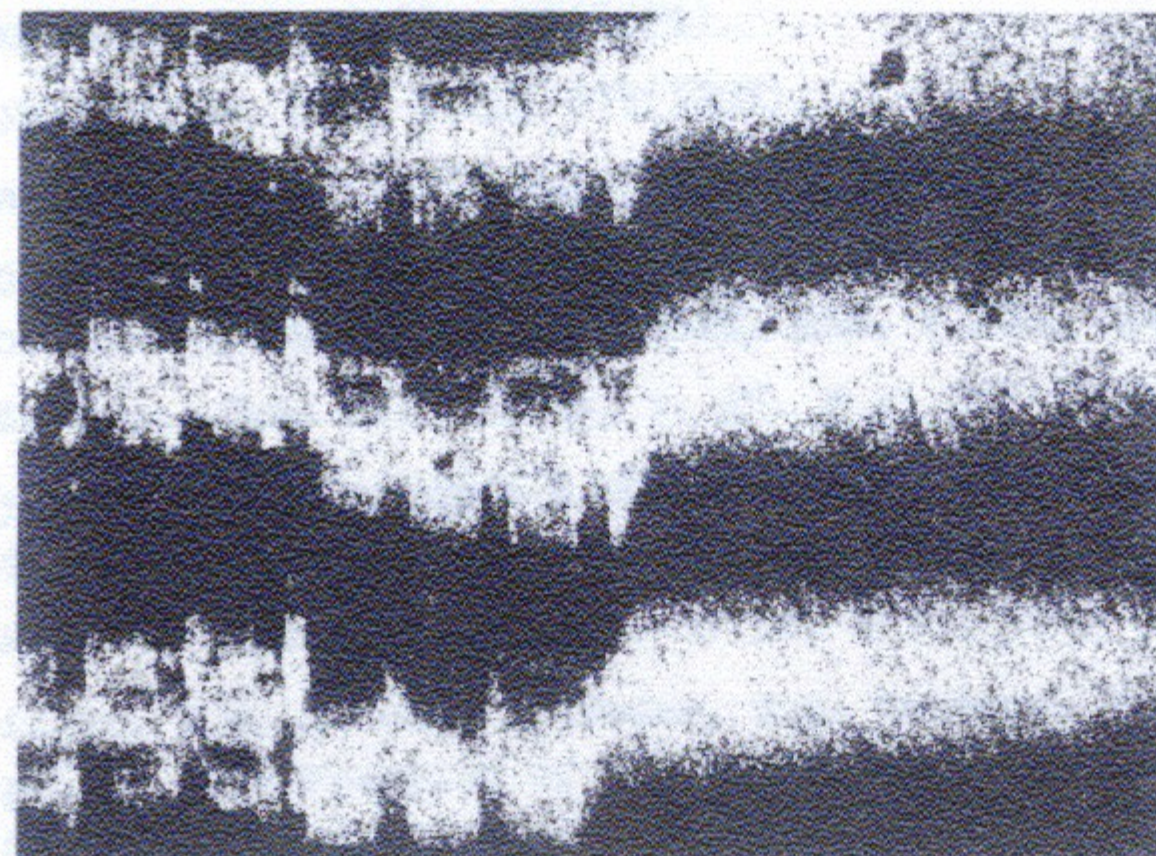


Рис.7. Изображение фазовой решетки в халькогенидной пленке, наблюдаемое методом "ширинг" в интерференционном микроскопе.

кажется применение синхротронного излучения для рентгеновской литографии /9/ при создании различных элементов интегральной оптики и полупроводниковых микросхем с высоким уровнем интеграции.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Haensel. Труды третьего Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т. I. М., "Наука", 1973, стр. 17.
2. М.Н. Якименко. УФН, т. 114, 55 (1974).
3. Д.Б. Гогоберидзе. УФН, т. 50, 577 (1963).
4. Y. Ohmachi, T. Igo. Appl. Phys. Lett., v. 20, № 12, 506 (1972).
5. Т.Д. Мокульская, М.А. Мокульский, А.А. Никитин, В.В. Анашин, Г.Н. Кулипанов, В.А. Лукашов, А.Н. Скринский. ДАН, т. 218, 824 (1974).
6. S.A. Keneman. Thin Sol. Films, v. 21, № 2, 281 (1974).
7. И.Н. Рубцов. Фотолитография и оптика. Под ред. Федотова и Г. Поля, стр. 341, М., "Советское радио", Берлин, "Техника", 1974.
8. W. Lokosz. J. Optic. Soc. Amer. v. 56, № 11, 1463 (1966).
9. E. Spiller, D.E. Estman, R. Feder, W.D. Grobman, W. Gudut, J. Topalian. The Preprint of the Deutsches Elektronen-synchrotron SR-76/11, Hamburg, June 1976.

