

ЛИТЕРАТУРА

1. Колесников А. Г. Тр. МГИ АН СССР, 3, 106—127, 1953.
2. Богусловский С. Г. Тр. МГИ АН СССР, 13, 3—13, 1958.
3. Восканян А. Г., Пивоваров А. А., Хунджуа Г. Г. «Океанология», 10, 588—595, 1970.
4. Сизов А. А. Тр. МГИ АН СССР, 25, 65—68, 1962.
5. Пивоваров А. А. «Изв. АН СССР», физика атмосферы и океана, 4, 102—107, 1968.
6. Лайхтман Д. Л. Физика пограничного слоя атмосферы. Л., 1961, стр. 97—101.
7. Восканян А. Г., Пивоваров А. А., Хунджуа Г. Г. «Изв. АН СССР», физика атмосферы и океана, 3, 1210—1216, 1967.

Поступила в редакцию
10.10 1973 г.

Кафедра
физики моря и вод суши

УДК 621.385.833

Ф. Ф. КУШНИР, Л. Ф. КОМОЛОВА, Г. В. СПИВАК, Г. В. САПАРИН

О РЕНТГЕНО-РАСТРОВОЙ МОДУЛЯЦИОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Рентгеновская просвечивающая электронная микроскопия, несмотря на относительно невысокое разрешение (порядка 0,1—0,3 мкм), успешно применяется для изучения различных объектов в биологии и медицине [1].

При разработке «точечного» просвечивающего рентгеновского микроскопа необходимо учитывать ряд требований. Прежде всего, разрешение прибора, зависящее как от диаметра электронного луча, так и от толщины мишени и самого объекта, должно быть наилучшим. Кроме того, необходимо предусмотреть возможность наблюдения объектов в обычных условиях, например, при атмосферном давлении и получения качественного изображения при «сходящем», т. е. мало интенсивном рентгеновском излучении и притом за короткое время.

Недавно нами был осуществлен и описан «точечный» микроскоп, который был сопряжен с растровым электронным микроскопом (РЭМ) [2]. В нем роль электронной мишени играла тонкая металлическая пленка на образце, а в качестве освещающего луча используется хорошо сфокусированный электронный луч РЭМ. При достаточно тонких мишенях и объектах можно достичь хорошего разрешения [2], но объект должен помещаться в вакуум. Можно, например, создавать рентгеновскую трубку с микрофокусом. В этом случае мишень является не только источником рентгеновского излучения, но и барьером между вакуумом в трубке и атмосферой. Это естественно приводит к увеличению толщины мишени (а следовательно, к ухудшению разрешения), так как она должна выдерживать атмосферное давление, но зато сам объект может находиться в атмосфере. Часто при исследовании биологических и растительных объектов необходимо уменьшить дозу рентгеновского облучения. Снижение дозы облучения приводит к ослаблению полезного сигнала и уменьшению отношения сигнал/шум. Качество изображения резко ухудшается из-за возрастания помех и шумов. В данной работе показано, что снижение дозы облучения одновременно с подавлением шумов и получением качественной картины может быть достигнуто за счет частотной модуляции первичного электронного луча и последующего резонансного усиления видеосигнала. Нами сопоставляются результаты, полученные в [2], с описанными в данной статье.

Отметим, что в [3], например, описаны эксперименты по рентгеновской микроскопии, и притом в некоторых случаях, с достаточно высоким разрешением. Однако для получения снимков были необходимы большие времена экспозиций, что говорит о сравнительно низкой чувствительности приемника рентгеновского излучения. В этом аспекте использованный нами прием модулированного сигнала в резонансе имеет неоспоримое преимущество.

Описание устройства и результаты. На рис. 1, а показана общая схема рентгеновского растрового электронного микроскопа. Прибор был осуществлен на базе РЭМ «стереоская», в котором нами была введена модуляция электронного луча 1, осуществляемая с помощью отклоняющих пластин 2, на которые подается напряжение от генератора прямоугольных импульсов 3. Коллектор вторичных электронов был заменен на приемник модулированного рентгеновского излучения, состоящий из сцинтиллятора, светопровода, фотоумножителя 5, резонансного усилителя 6 и далее всей системы развертки усиления и получения изображения в РЭМ (4, 7, 8) (4 — блок-схема развертки, 7 — видеоусилитель, 8 — видеоконтрольное устройство).

Узел А представляет собой одновременно камеру образца и устройство для регистрации рентгеновского излучения (рис. 1, б). Непосредственно над сцинтиллятором 4

помещался образец 2, на поверхность которого напыляется слой тяжелого металла 1 (например, висмута). Электронный пучок, сканирующий по поверхности объекта, возбуждает модулированное рентгеновское излучение, часть которого проходит сквозь пленку-мишень и проникает затем через образец (3 — бериллиевая пластинка, 5 — светопровод). Излучение, которое достигает сцинтиллятора, несет информацию о внутренней структуре образца и создает модулированный видеосигнал, формирующий изображение. Разрешение такого метода определяется сечением конуса потока рентгеновского излучения, выходящего из объекта в плоскости, обращенной к сцинтиллятору, и зависит от толщины образца [2]. Использование резонансной методики увеличивает чувствительность к рентгеновскому излучению до 5 раз, что позволяет снизить дозу облучения объекта даже по сравнению с методом, использующим для усиления ЭОП [4]. Длительность экспозиции сокращается и достигает 100—200 сек, тогда как в обычном теновом рентгеновском микроскопе это время достигает 30 мин [5].

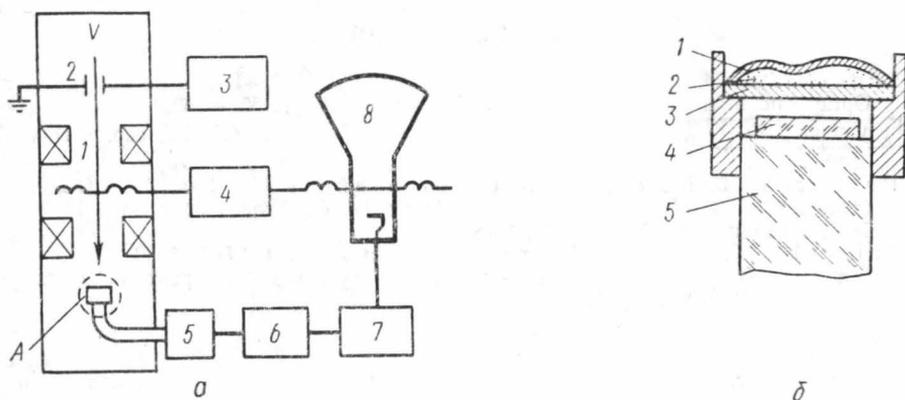
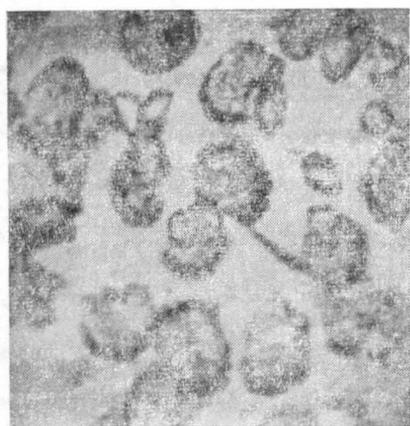
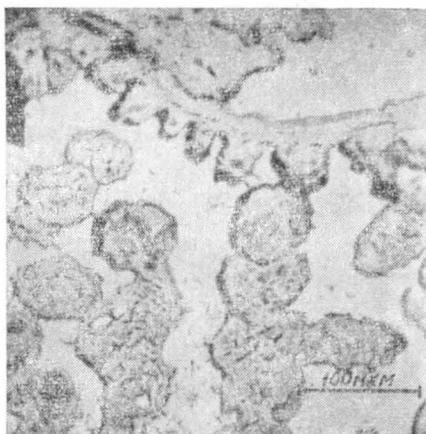


Рис. 1. Общая схема рентгеновского растрового модуляционного микроскопа: *а* — блок-схема прибора, *б* — камера образца и устройство для регистрации рентгеновского излучения

Рис. 2, *а* демонстрирует рентгеновское изображение гельминта в РЭМ по методу [2], т. е. без использования приема и усиления модулированного сигнала. Срезы имели толщину ~ 7 мкм и монтировались на бериллиевой подложке толщиной 200 мкм, которая защищала сцинтиллятор от проходящих быстрых электронов. На срез напылялся



а



б

Рис. 2. Рентгеновское изображение среза гельминта: *а* — полученное обычным методом [2], *б* — полученное с применением модуляционной методики ($f_{\text{мод}}=150$ кГц)

слой висмута толщиной 0,3—0,5 мкм, который служил мишенью для электронного пучка, возбуждающего в нем рентгеновское излучение. Снимки были получены при ускоряющем напряжении 12 кВ с увеличением 200*.

Изображение на рис. 2, б было получено модуляционным способом ($f_{\text{мод}} = 150 \text{ кгц}$). Из рассмотрения фотографий видно, что значительно повышается разрешение, а следовательно, «четкость» картины.

Таким образом, развитая методика характеризуется заметным увеличением чувствительности при регистрации рентгеновского излучения, дает возможность управлять контрастом за счет имеющихся в РЭМ радиотехнических средств усиления сигнала, позволяет уменьшить дозу облучения и время экспозиции.

Для получения наилучших по разрешению результатов в рентгеновской картине объекта необходимо учитывать толщину и род пленочного покрытия (мишени), природу объекта, энергию и качество фокусировки электронного луча.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Saunders C. H., Bell M. A., Carvallo V. R. *Proced. Intern. Congr. X-ray Optics and Microanalysis*, Berlin — Heidelberg, 1969, pp. 550—569.
2. Кушнир Ф. Ф., Комолова Л. Ф. и др. «Изв. АН СССР», сер. физич., **36**, 1880, 1972.
- ✓ 3. Ровинский Б. М., Люцау В. Г., Авдеенко А. И. «Изв. АН СССР», сер. физич., **20**, 1956; Cosslett V. E., Nixon W. C. *Proced. Roy Soc.*, **140B**, 422, 1952; Nixon W. C. *Nature*, **175**, 1078, 1955.
4. Catchpole C. E. *Adr. in Electr. and Electron Phys.*, **16**, 567, 1962.
- ✓ 5. Братов О. П., Денисов Н. В. и др. «Аппаратура и методы рентгеновского анализа», вып. IV, 1969, стр. 3.

Поступила в редакцию
17.9 1973 г.

Кафедра
электроники