

# ИОННЫЙ ПРОЕКТОР

ИОННЫЙ ПРОЕКТОР (полевой ионный микроскоп, автоионный микроскоп), безлинзовый ионно-оптич. прибор для получения увеличенного в неск. миллионов раз изображения поверхности твёрдого тела (чаще металла). С помощью И. п. можно различать детали поверхности, разделённые расстояниями ок. 0,2–0,3 нм, что даёт возможность наблюдать расположение отд. атомов в кристаллич. решётке. И. п. изобретён в 1951 нем. физиком Э. В. Мюллером, создавшим ранее [электронный проектор](#).

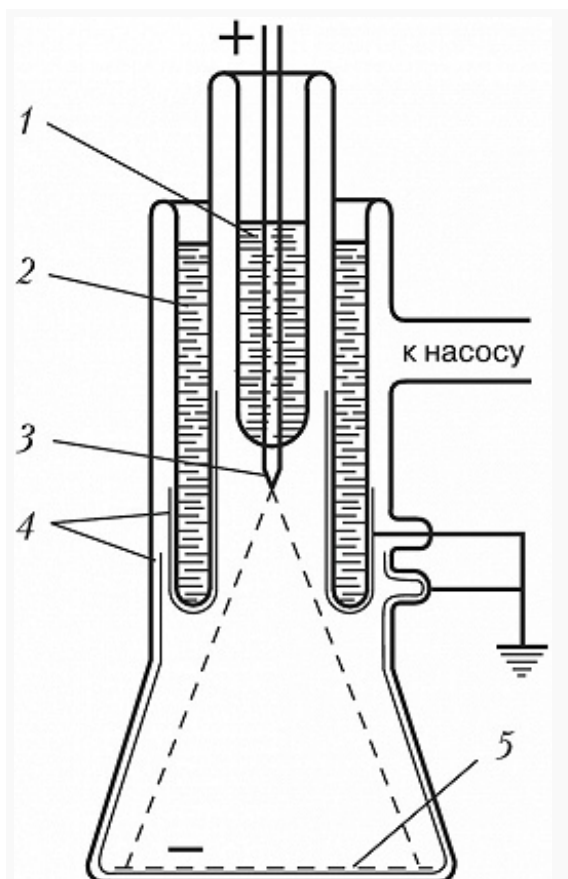


Рис. 1. Схема дуоплазматрона: 1 – катод; 2 – промежуточный электрод; 3 – катушка электромагнита; 4 – анод; 5 –

Принципиальная схема И. п. показана на рис. 1. Положительным электродом и одновременно объектом, поверхность которого изображается на экране, служит остриё тонкой проводящей иглы. Атомы (или молекулы) рабочего (изображающего) газа, заполняющего объём прибора, ионизуются в сильном электрич. поле вблизи поверхности острия, отдавая ему свои электроны. Возникшие положительные ионы приобретают под действием поля радиальное ускорение, устремляются к флуоресцирующему экрану (потенциал которого отрицателен) и бомбардируют его. Свечение каждого элемента экрана пропорционально плотности приходящего на него ионного тока. Поэтому распределение свечения на экране воспроизводит в увеличенном масштабе распределение вероятности образования ионов вблизи острия, отражающее структуру

экстрактор; I – катодная плазма;

II – анодная п...

поверхности объекта. Масштаб увеличения  $m$  примерно равен отношению радиуса экрана  $R$  к радиусу кривизны острия

$r$ , т. е.

$$m = R/r.$$

Вероятность прямой ионизации атома (молекулы) газа электрич. полем оказывается значительной, если на расстояниях порядка размеров атома (молекулы) газа создаётся падение потенциала порядка ионизационного потенциала этой частицы (см. [Ионизация полем](#)). Это значит, что напряжённость поля должна достигать 20–60 В/нм. Столь сильное поле легко создать у поверхности острия (на расстоянии 0,5–1 нм от неё) при достаточно малом радиусе кривизны поверхности (от 10 до 100 нм). Именно поэтому (наряду со стремлением к большим увеличениям) образец в И. п. изготовлен в виде тонкого острия.

Вблизи острия электрич. поле неоднородно – над ступеньками кристаллич. решётки или отд. выступающими атомами его локальная напряжённость увеличивается: на таких участках вероятность ионизации полем выше и количество ионов, образующихся в единицу времени, больше. На экране эти участки отображаются в виде ярких точек. Иными словами, контрастность изображения поверхности определяется наличием у неё локального микрорельефа. Др. фактором, влияющим на контраст изображения, является электронная природа атома: так, напр., в сплаве

Со и

Pt более электроотрицательные атомы

Pt отображаются как яркие точки, а находящиеся рядом атомы

Со не видны.

Изображение, формируемое И. п., характеризуется низкой яркостью. Отдельный выступающий на поверхности образца атом «эмитирует» примерно от  $10^3$  до  $10^8$  ионов/с, которые формируют на экране изображение размером обычно ок.  $1 \text{ нм}^2$ . Непосредственное фотографирование такого изображения при использовании водорода или гелия в качестве рабочего газа требует времени экспозиции порядка  $10\text{--}10^3$  с при потенциале на эмиттере от 20 до 4 кВ. Следовательно, для наблюдения

и распознавания поверхностей, которые нестабильны при приложенном изображающем поле, и фотографирования изображений подобных поверхностей в доли секунды необходимо усилить яркость изображений.

Повышение плотности ионного тока (а следовательно, яркости и контрастности изображения) за счёт повышения давления газа и увеличения динамич. подачи газа к острию малоэффективно и имеет недостатки. Напр., давление обычно не превышает 0,1 Па, иначе возникает газовый разряд, а усиленная подача газа может привести к разрушению экрана вследствие бомбардировки. Для получения ярких и контрастных изображений в И. п. используются фотоэлектронные усилители яркости, волоконно-оптич. пластины, микроканальные пластины, а также конвертирование ионного изображения в электронное.

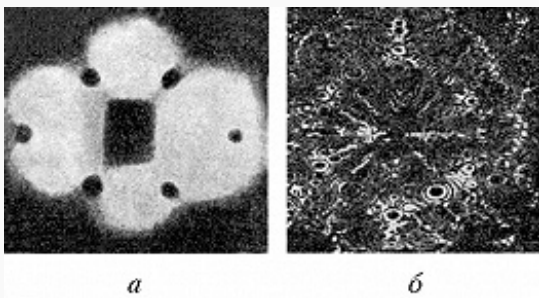


Рис. 2. Изображение поверхности вольфрамового острия радиусом 95 нм при увеличении в 106 раз в электронном проекторе (а) и в гелиевом ионном проекторе (б) при температуре 22 К. На первом изображении м...

Разрешающая способность И. п.

б находится в обратной зависимости от тангенциальной составляющей скорости иона, т. е. чем меньше кинетич. энергия ионизирующей частицы, тем выше

б. Поэтому остриё И. п. обычно охлаждается жидким водородом и азотом. В сильном электрич. поле атомы газа адсорбируются на участках с наибольшей локальной напряжённостью поля (т. н. полевая адсорбция). Их присутствие даёт возможность получать высокодетализированное изображение (рис. 2), т. к. полевая ионизация

изображающих частиц облегчается при полевой адсорбции на ранее адсорбированных частицах. Чем выше потенциал ионизации частиц, тем большее разрешение они обеспечивают. Лучшими изображающими газами являются гелий и неон. Однако при этом требуются более сильные электрич. поля, что ограничивает круг исследуемых объектов из-за полевого испарения (см. Десорбция полем).

Примесь к рабочему газу другого газа снижает величину изображающего поля за счёт понижения порогового поля полевой адсорбции.

Часто в И. п. применяют внутр. микроканальный умножитель (МКУ), который конвертирует ионный ток в электронный, многократно его усиливает и обеспечивает яркое изображение на экране. МКУ позволили использовать разнообразные рабочие газы, понижать их давление и тем самым значительно расширили возможности ионного проектора.

И. п. широко применяется для исследования атомной структуры поверхности металлов, сплавов и соединений. С его помощью определяются параметры поверхностной диффузии отд. атомов и их элементарных ассоциатов; при этом выявляются механизмы перемещения, что недоступно для др. методов. С помощью И. п. наблюдают и изучают двумерные фазовые превращения; в атомном масштабе исследуют внутр. дефекты в металлах и сплавах (вакансии, атомы в междоузлиях, дислокации, дефекты упаковки и др.); исследуют потенциалы межатомного взаимодействия, электронные свойства элементарных поверхностных объектов; анализируют объёмы образцов посредством управляемого послойного удаления поверхностных атомов, используя поленое испарение при криогенных температурах.

Исследования с применением И. п. привели к радикальному пересмотру представлений о границах зёрен в поликристаллах. Сочетание И. п. с масс-спектрометром, регистрирующим отд. ионы, привело к изобретению атомного зонда, расширившего аналитич. возможности прибора.

## Литература

Лит.: Мюллер Э., Цонь Т. Автоионная микроскопия. М., 1972; они же. Полевая ионная микроскопия, полевая ионизация и поленое испарение. М., 1980; Зенгуил Э. Физика поверхности. М., 1990.