

3/97-A-Sf-

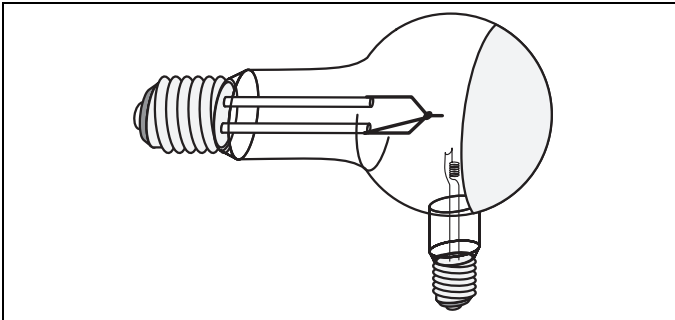


Fig. 1

1 Sicherheitshinweise

- Bitte beachten Sie die Anweisungen zur Handhabung in Abschnitt 4 (S. 4-6) sehr genau, um Fehlbedienungen, bei denen das Gerät Schaden nehmen kann, auszuschließen.
- Verwenden Sie zum Versuchsaufbau nur die Geräte, die von uns vorgeschlagen sind.
Dies gilt insbesondere für die Hochspannungsversorgung und die hochspannungsfeste Heizspannungsquelle (s. Abschnitt 4.1)
- Das Feldemissions-Mikroskop ist ein Störstrahler im Sinne der Röntgenverordnung.
Beim Betrieb mit den angegebenen Hochspannungsnetzgeräten 10 kV (521 70 und 522 37* ist sichergestellt, daß die Dosisleistung der emittierten Röntgenstrahlung unterhalb des zulässigen Grenzwertes liegt. Dies gilt für Feldemissions-Mikroskope mit unbeschädigter Wolframspitze, die ein Schirmbild gemäß Fig. 4/5 liefert.
Ein Feldemissions-Mikroskop mit defekter Wolframspitze (kein gleichmäßiges Bild wie in Fig. 4/5, sondern scharf begrenzte Leuchterscheinungen auf dem Bildschirm) darf nicht mehr mit Anodenspannungen über 5 kV betrieben werden; es können dann unter ungünstigen Bedingungen erhöhte Dosisleistungen infolge der im Feldemissions-Mikroskop erzeugten Röntgenstrahlung auftreten.
- Säubern Sie nach jeder Versuchspause die Katode durch vorschriftsmäßiges Heizen von 60 s Dauer.
Größere Verunreinigungen der Katode durch absorbierte Restgase gefährden die Lebensdauer der Röhre.
- **Barium-Heizung:**
7,5 A bis 8 A (bis zum Auftreten schwacher Rotglut)
Strommesser auf isolierende Unterlage, z.B. Glasplatte, stellen.
Heftiges Verdampfen von Barium macht die Röhre unbrauchbar.
- **Katodenheizung:**
1,6 A bis 1,8 A; maximal 1,9 A
Meßgerät der Klasse 1,5 (oder besser) verwenden; Meßbereich ≤ 3 A
Die Lebensdauer der Katode wird durch einen möglichst niedrigen Heizstrom verlängert.
Ein Strom über 1,9 A kann zum Verdampfen des Wolframs führen; dadurch wird die Katode sofort zerstört.
- Vermeiden Sie das plötzliche Anlegen von Hochspannung. Sorgen Sie für guten Kontakt an den Fassungen. Schützen Sie den Leuchtschirm vor direktem Sonnenlicht.
- Beachten Sie, daß die Röhre evakuiert ist; eine mechanische Beschädigung der Röhre kann wegen der herumfliegenden Glassplinter gefährlich werden.

* nicht mehr lieferbar

Gebrauchsanweisung Instruction Sheet

554 60

Feldemissions-Mikroskop Field Emission Microscope

1 Safety notes

- Please follow the instructions given in Section 4 "Operation" (pages 4 to 6) to the letter so that faulty operation, which can cause damage to the instrument, can be prevented.
- Use only the devices recommended for this experiment set-up.
This applies in particular for the high-voltage supply and the high-voltage proof heating-voltage supply (see section 4.1).
- The field emission microscope is an interference radiator within the meaning of German x-ray regulations.
Operating the apparatus with the specified high-voltage power supply units 10 kV (521 70 and 255 37*) ensures that the dose rate of the emitted x-ray radiation remains within the permissible maximum value. This applies for a field emission microscope with undamaged tungsten tip, which produces an image of the type shown in Fig. 4/5.
A field emission microscope with a defective tungsten tip (no uniform image as shown in Fig. 4/5, but sharply defined luminance phenomena on the screen) must not be operated with anode voltages greater than 5 kV. Under unfavorable conditions, excessive dose rates may result due to the x-ray radiation generated in the field emission microscope.
- Always clean the cathode during experiment intervals by heating it in the prescribed manner for a period of 60 s.
Severe contamination of the cathode caused by absorbed residual gases will shorten the life of the tube.
- **Barium heating:**
7.5 A to 8 A (until a dull red glow appears)
Place the ammeter on an insulated surface, e.g. glass plate.
Intensive barium vaporization makes the tube unusable.
- **Cathode heating:**
1.6 A to 1.8 A; maximum 1.9 A
Use a class 1.5 (or better) meter; measuring range ≤ 3 A
For maximum cathode life, keep the heating current as low as possible.
Currents over 1.9 A can vaporize the tungsten. This destroys the cathode immediately.
- Avoid sudden applications of high voltage. Make sure that the sockets make good contact. Protect the fluorescent screen from direct sunlight.
- Please bear in mind that the tube is evacuated; mechanical damage to the tube could be hazardous due to flying glass splinters.

*discontinued

Das Feldemissions-Mikroskop macht die Oberfläche eines Wolfram-Einkristalles in etwa 500 000facher Vergrößerung durch ein Abbild der von Punkt zu Punkt unterschiedlichen Elektronen-Emissionsfähigkeit sichtbar. Bei dieser außerordentlich hohen Vergrößerung und einem Auflösungsvermögen von 2 nm bis 3 nm sind bereits einzelne auf der Wolfram-Oberfläche niedergeschlagenen Barium-Atome und deren Temperaturbewegung zu beobachten.

The field emission electron microscope renders the surface of a tungsten monocrystal visible at a scale of magnification of approx. 500,000, by forming an image of the point-to-point differences of the electron emissivity of the surface. With this very high magnification and a resolving power of 2 nm to 3 nm, it is possible to observe individual barium atoms deposited on the tungsten surface, and their thermal agitation.

2 Beschreibung; technische Daten

2 Description; technical data

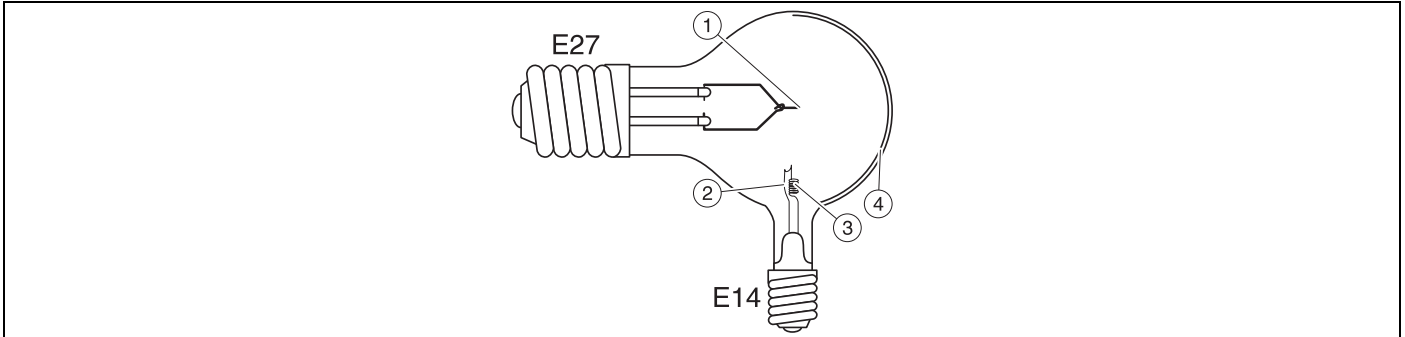


Fig. 2
Schematische Darstellung des Feldemissions-Mikroskopes:

- ① Katode (Wolframspitze)
- ② Anode mit Bariumvorrat in ringförmiger Mulde
- ③ Heizung für Bariumvorrat
- ④ Leuchtschirm

Die Fig. 2 zeigt ein Feldemissions-Mikroskop in schematischer Darstellung. In dem glühlampenähnlichen Glasgefäß befindet sich im Mittelpunkt des innen angebrachten Leuchtschirms ④ die als feine Spitze ausgebildete Katode ①. Diese Spitze ist in Fig. 2 vergrößert gezeichnet und bildet das Ende eines zu einer Schlaufe zusammengedrückten Wolframdrahtes, der an den Glühlampensockel (E 27) angeschlossen sind. Seitlich von der Spitze befindet sich die Anode ② mit ringförmiger heizbarer Mulde, in die der Bariumvorrat eingebettet ist. Anode und Bariumheizung sind mit einem Glühlampensockel E 14 verbunden. Der Glaskolben ist auf extrem hohes Vakuum ausgepumpt und abgeschmolzen.

Der Durchmesser der Wolframkatode ist an seiner Spitze kleiner als eine Wellenlänge des sichtbaren Lichtes. Derartig feine Spitzen werden durch Ätzprozesse hergestellt und die zunächst noch unregelmäßige Form durch Glühen im Ultrahochvakuum verrundet. Der Spitzeneinkristall erscheint nach der Glühbehandlung nicht als kantiges Polyeder, sondern in Übereinstimmung mit der Theorie als verrundete Auflösungsform. An dieser stellen die abgeflachten Bereiche die sog. Gleichgewichtsformflächen dar: (011), (001), (112). Wegen der Abflachung und der relativ hohen Austrittsarbeit erscheinen diese Bereiche als dunkle Flecken im Mikroskop-Bild der sauberen Spitze.

Technische Daten:

Vergrößerung:	ca. 500 000fach
Auflösungsvermögen:	2 bis 3 nm
Krümmungsradius der Wolframspitze:	0,1 bis 0,2 μm
Kolbendurchmesser:	10 cm
Druck:	ca. 10^{-7} hPa ($\cong 10^{-7}$ mbar)
Anodenspannung U_A :	typisch 4 kV bis 8 kV
Anodenstrom I_A :	ca. 10 μA
Strom I_W zum Ausheizen der Wolframspitze:	1,6 A bis 1,8 A; max. 1,9 A
Strom I_B zum Erwärmen des Bariumvorrates:	7,5 A bis max. 8 A

Fig. 2
Schematic diagram of the field emission microscope:

- ① Cathode (tungsten tip)
- ② Anode with barium supply in ring-shaped trough
- ③ Heating for barium supply
- ④ fluorescent screen

Fig. 2 shows a field emission electron microscope in schematic representation. A lightbulb-like glass vessel contains at the center of the internally mounted fluorescent screen ④ the cathode ① shaped as a fine point. In Fig. 2 this tip is shown enlarged. It forms one end of a tungsten wire bent into a loop, which is connected to the lamp socket (E 27). The anode ② with the ring-shaped trough for the barium (Ba) is situated laterally to the tip. The anode and barium heating are connected to a lamp socket (E 14). The glass bulb is evacuated to produce an extremely high vacuum, and fused.

The tip of the tungsten cathode has a diameter of less than one wavelength of visible light. Such fine tips are made by etching processes, whereby their initially irregular shape is rounded off by baking them in an ultra-high vacuum. After this treatment, the monocrystal tip no longer appears as a sharp-edged polyhedron, but as a rounded-off form, in agreement with theory. The flattened regions here represent the so-called equilibrium shape faces: (011), (001), (112). Due to the flatness and the relatively high electron work function these regions appear as dark patches in the microscope image of the clean cathode tip.

Technical data

Magnification:	approx. 500,000x
Resolving power:	2 nm to 3 nm
Radius of curvature of the tungsten tip:	0.1 μm to 0.2 μm
Dia. of bulb:	10 cm
Pressure:	approx. 10^{-7} hPa ($\cong 10^{-7}$ mbar)
Anode voltage U_A :	typically 4 kV to 8 kV
Anode current I_A :	approx. 10 μA
Current I_W for heating the tungsten tip:	1.6 A to 1.8 A; max. 1.9 A
Current I_B for heating the barium:	7.5 A to 8 A max.

3 Wirkungsweise

Der Unterschied zwischen einem Feldemissions-Mikroskop und einem Elektronenmikroskop, das mit elektrostatischen bzw. elektromagnetischen Linsen arbeitet, besteht im wesentlichen in folgenden zwei Punkten:

- Als Elektronenquelle benutzt das Feldemissions-Mikroskop nicht mehr einen Glühdraht, sondern eine außerordentlich feine verrundete Wolframspitze. Abgebildet wird nicht mehr ein in den Strahlengang gebrachtes Objekt, sondern eben diese Elektronen emittierende Oberfläche der Wolframspitze mittels der um diese Spitze vorhandenen Feldverteilung.
- Zwischen der Wolframspitze und der dazu konzentrischen Glaskalotte der Röhre stellt sich ein kugelsymmetrisches Feld ein, dessen Kraftlinien geradlinig auseinanderstrahlend verlaufen. In der Nähe der Katodenoberfläche erreicht die Feldstärke sehr hohe Werte.

Beispielsweise würde bei einem Katodenradius $R = 10^{-6}$ m und einer Spannung $U = 10^4$ V die Feldstärke 10^{10} V/m betragen. Solche Feldstärken lassen sich aber unter Normalbedingungen nicht aufrechterhalten. In Luft von Atmosphärendruck setzt sich die Durchbruchfeldstärke der Luft, die etwa $2 \cdot 10^6$ V/m bis $3 \cdot 10^6$ V/m beträgt, der Feldstärke an der Kugeloberfläche eine Grenze. Auch bei vermindertem Druck wird diese Feldstärke nicht überschritten, solange noch eine selbständige Entladung mit den vorhandenen Gasresten auftreten kann. Erst in einem auf 10^{-7} hPa ausgepumpten Rohr, in dem eine selbständige Entladung nicht mehr auftritt, kann die Feldstärke an einer feinen Spitze mit halbkugelförmigem Abschluß auf hohe Werte gesteigert werden. Wenn die Feldstärke an der negativ gepolten Spitze in die Größenordnung von einigen 10^9 V/m kommt, so können Leitungselektronen aus dem Metall in das Vakuum austreten. Dieser Austritt von Elektronen aus der Metalloberfläche ist ein nur wellenmechanisch erklärbarer physikalischer Vorgang (Tunneleffekt).

Solche durch Feldemission aus der feinen Spitze der Katode austretenden Elektronen bewegen sich in dem elektrischen Feld in Richtung der Feldlinien, die in der Nähe der Spitze von ihrer halbkugelförmigen Kalotte aus ungefähr radial nach außen verlaufen. Die Elektronen fliegen in dem extrem hohen Vakuum praktisch ohne Zusammenstoß in radialer Richtung auf den Leuchtschirm.

Zwei in einem linearen Abstand Θ von der Kalottenoberfläche der Spitze abliegende Elektronen treffen auf dem Leuchtschirm mit dem Linearabstand Δ auf. Das Vergrößerungsverhältnis $G = \Delta/\Theta$ ist bei diesem Feldemissions-Mikroskop einfach durch das Verhältnis der Kalottenradien von Glaskolben und Spitze gegeben:

$$G = \frac{\Delta}{\Theta} = \frac{R}{r}$$

Beträgt der Kalottenradius r der Spitze, wie man es praktisch erreichen kann, 0,1 bis 0,2 μm , und der Radius des Glaskolben $R = 5$ cm, so wird $G = 5 \cdot 10^5$ bis $2,5 \cdot 10^5$. Die größte erreichbare Vergrößerung beim Feldemissions-Mikroskop ist etwa millionenfach. Sie übertrifft die Vergrößerung der Durchstrahlungselektronenmikroskope wesentlich.

Unter den genannten Bedingungen liefert das Feldemissions-Mikroskop bei Abständen auf dem Leuchtschirm von etwa 0,5 mm noch eine Trennung von Punkten, die auf der halbkugelförmigen Spitze einen Abstand von nur $1 \cdot 10^{-9}$ m bis $2 \cdot 10^{-9}$ m haben. Solche Abstände sind aber schon in der Größenordnung atomarer Dimensionen. So ist z.B. der Kugeldurchmesser eines Bariumatoms etwa $0,4 \cdot 10^{-9}$ m. Daher kann das Feldemissions-Mikroskop solche atomaren Größen auf dem Leuchtschirm als Bilder wiedergeben.

3 How the microscope works

The following two points constitute the essential difference between a field emission microscope and an electron microscope working with electrostatic or electromagnetic lenses. The electron source in the field emission microscope is not an incandescent wire, but an extraordinarily fine rounded tungsten tip.

- What is imaged is not an object brought into the path of the beam, but the electrons themselves emitted from the tip surface, by virtue of the field about this tip.
- Between the tungsten tip and the concentrically arranged glass section of the tube, a field with spherical symmetry is established, whose lines of force proceed radially outwards. Near the cathode surface the intensity of the field attains very high values.

Thus, in the case of a cathode radius of $R = 10^{-6}$ m and a voltage $U = 10^4$ V, the field strength would amount to 10^{10} V/m. However, such field strengths cannot be maintained under normal conditions. In air at atmospheric pressure, the breakdown field strength of air, which is approx. $2 \cdot 10^6$ V/m to $3 \cdot 10^6$ V/m, sets a limit to the strength of the field at the surface of the sphere. Even at reduced pressure this strength cannot be exceeded as long as a spontaneous discharge is possible with the residual gases present. Only in a tube evacuated to 10^{-7} bar by modern means, in which spontaneous discharges no longer occur, can the electric field strength around a fine tip with hemispherical form be increased to high values. If the intensity at the negatively poled tip becomes of the order of some 10^9 V/m, conduction electrons can escape from the metal into the vacuum. This emergence of electrons from the metal surface is a physical process that can only be explained by the concepts of wave mechanics (tunnel effect).

Such electrons issuing from the fine cathode tip by field emission move toward the lines of force of the electric field. In the proximity of the tip, these proceed outwards approximately radially from the hemispherical cap. In the extremely high vacuum, the electrons travel to the fluorescent screen in a radial direction practically without undergoing any collisions on their way.

Two electrons leaving the hemispherical tip of the cathode at a linear distance Θ will impinge on the fluorescent screen at a linear distance Δ . The magnification ratio $G = \Delta/\Theta$ of the field emission microscope is simply given by the quotient of the radii of the glass bulb and tip:

$$G = \frac{\Delta}{\Theta} = \frac{R}{r}$$

If the radius of the hemisphere r of the tip is 0.1 to 0.2 μm , which is possible in practical terms, and the radius of the spherical part of the bulb is $R = 5$ cm, then $G = 5 \cdot 10^5$ to $2.5 \cdot 10^5$. The largest magnification of which the field emission microscope is capable is approx. 1,000,000x. This substantially exceeds the magnification possible with a conventional electron microscope.

Under these conditions, distances on the fluorescent screen of the field emission microscope of about 0.5 mm correspond to separate points on the hemispherical tip that have a distance of only $1 \cdot 10^{-9}$ m to $2 \cdot 10^{-9}$ m. But such distances are already in the order of magnitude of atomic dimensions. Thus, e.g., the spherical diameter of a barium atom is approx. $0.4 \cdot 10^{-9}$ m. Therefore, the field emission microscope can reproduce such atomic dimensions as images on the fluorescent screen.

4 Inbetriebnahme

Wichtig: Sicherheitshinweise auf S. 1 beachten!

4.1 Erforderliches Zubehör, Schaltung (s. Fig. 3)

Hochspannung:		
1 Hochspannungsnetzgerät, 10 kV	521 70	
oder		
1 Hochspannungsnetzgerät 10 KV	522 37*	
Heizspannungen;		
1 hochspannungsfeste, einstellbare, bis 10 A belastbare Kleinspannungsquelle für Bariumheizung;		
1 U-Kern mit Joch	562 11	
1 Spannvorrichtung	562 12	
1 Kleinspannungsspule	562 18	
bei 230 V Netzspannung:		
1 Spule mit 1000 Windungen	562 15	
1 Schiebewiderstand, 1000 Ω	537 22	
bei 115 V Netzspannung:		
1 Spule mit 500 Windungen	562 14	
1 Schiebewiderstand, 320 Ω	537 23	
1 einstellbare Kleinspannungsquelle, bis 2 A- belastbar, zum Ausheizen der Katode, z.B. Kleinspannungstelltrafo S	521 35	
2 Strommesser, MB 3 A ~ und 10 A ~, Klasse 1,5, z.B. Demo-Multimeter	531 911	
1 Glasplatte (isolierende Unterlage für Strommesser von I_{BA}) z.B.	664 196	
1 Sicherheitsanschlußdose	502 06	
1 Fassung E 27 auf Stiel	451 18	
1 Fassung E 14	505 68	
1 Stativfuß, 20 cm Seitenlänge	300 02	

* nicht mehr lieferbar

4 Operation

Important: Please observe the safety notes provided on page 1!

4.1 Accessories required; circuit (see Fig. 3)

High voltage:		
1 High-voltage power supply unit, 10 kV	521 70	
or		
1 High-voltage power supply unit, 10 kV	522 37*	
Heating voltages:		
1 high-voltage proof, variable extra-low voltage source for barium heating, loading capacity up to 10 A;		
1 U-core with yoke	562 11	
1 Clamping device	562 12	
1 Extra-low voltage coil	562 18	
at 230 V mains voltage:		
1 Coil with 1000 turns	562 15	
1 Rheostat, 1000 Ω	537 22	
for 115 V mains voltage:		
1 Coil with 500 turns	562 14	
1 Rheostat, 320 Ω	537 23	
1 Variable extra low-voltage source, loading capacity up to 2 A DC, for cathode heating, e.g. Variable extra-low voltage transformer S	521 35	
2 Ammeters, measuring range 3 A DC and 10 A DC, class 1.5, e.g. Demo-multimeter	531 911	
1 Glass plate (insulating surface for ammeter of I_{BA}) e.g.	664 196	
1 Safety connecting box	502 06	
1 E 27 socket on rod	451 18	
1 E 14 socket	505 68	
1 Stand base, length of sides 20 cm	300 02	

*discontinued

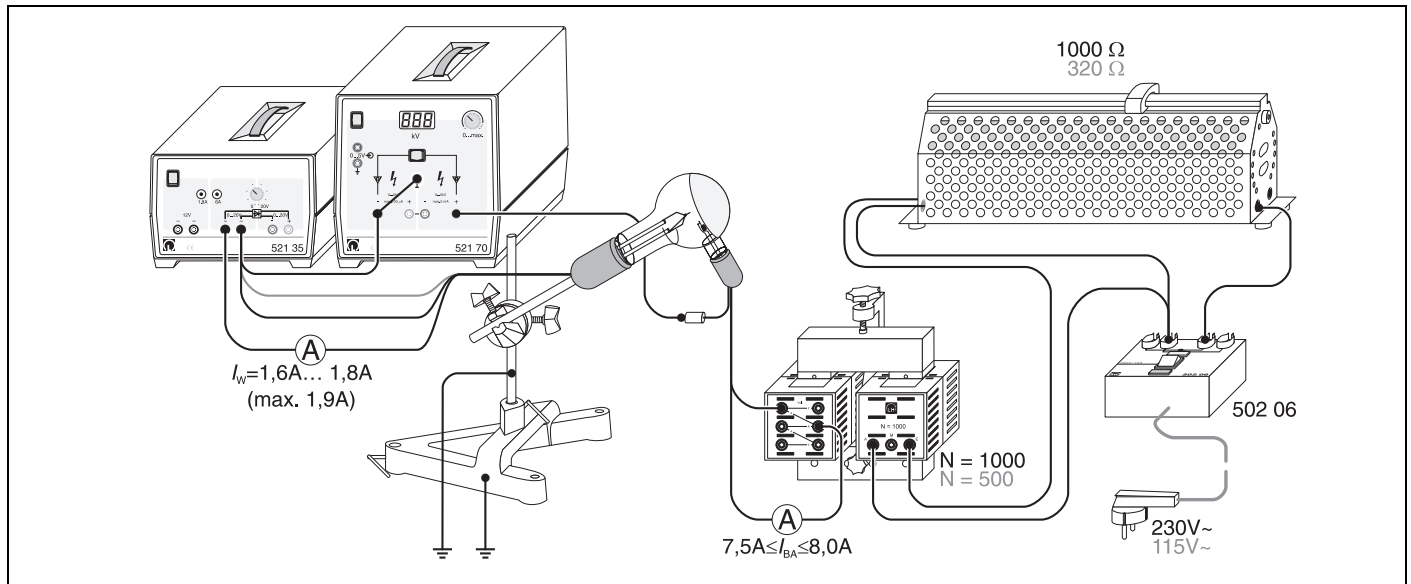


Fig. 3

4.2 Hochspannungsversorgung

Es ist wichtig, die Hochspannung erst **nach dem Ausheizen** der Wolframspitze einzuschalten und vom **Wert Null** ausgehend langsam zu steigern, bis ein ausreichend helles Bild im verdunkelten Raum erreicht wird.

Vor jedem Ausheizen der Katode Hochspannung auf Null zurückstellen und Rückgang der Ausgangsspannung auf Null abwarten (beim Netzgerät 10 kV, 521 70, nach max. 30 s); erfor-

4.2 High voltage supply

It is essential that the voltage be applied to the field emission microscope only **after** baking of the tungsten tip is completed and the voltage is **slowly** increased **from zero** until a sufficiently bright image is achieved in the dark room.

Each time before baking out the cathode, set the high voltage back to zero and wait until the output voltage drops to zero (max. 30 seconds for 10 kV power supply 521 70). Ground the

derlichenfalls Ausgang erden.

4.3 Heizspannungsversorgung

Die auf Hochspannung liegende Heizspannung für den Barium-Vorrat muß ausreichenden Isolationswiderstand besitzen, Der Experimentier-Transformator ist gut geeignet, andere Transformatoren meist nicht. Strommesser, mit denen der Strom I_{BA} für die Bariumheizung überwacht werden soll, müssen gut isoliert, z.B. auf einer Glasplatte (664 196), aufgestellt werden.

4.3.1 Ausheizen der Katode

Das Ausheizen geschieht, **bei hochspannungsfreier Röhre ($U_A = 0$)** und dient dazu, die Wolframspitze von absorbierten Fremdatomen zu befreien.

Die Katode muß ausgeheizt werden,:

- bevor erstmalig an einem Tag mit der Röhre experimentiert wird,
- nach Beendigung einer Vorführung mit bariumbedampfter Katode
- und wann immer es sonst nötig erscheint.

Zum Ausheizen ist ein Strom von 1,6 A bis 1,8 A erforderlich, der kontinuierlich **von Null bis zum Maximalwert eingestellt** werden muß und etwa 1 min. fließen soll.

Da die sehr empfindliche Spitze leicht zerstört werden kann, muß das Ausheizen mit großer Sorgfalt durchgeführt werden unter besonderer Berücksichtigung der folgenden Punkte:

Niemals Hochspannung und vollen Katoden-Heizstrom gleichzeitig anlegen. Vor jedem Ausheizen Restladung der Hochspannungsquelle beseitigen!

Heizstrom niemals in voller Höhe anlegen, sondern langsam unter ständiger Beobachtung des Strommessers für I_W erhöhen; 1,9 A nie überschreiten.

Bei abnormalen Leuchterscheinungen Hochspannung sofort abschalten und Katode ausheizen.

Zeigt sich während des Betriebes oder auch bei Inbetriebnahme, daß das Leuchten auf dem Schirm sich auf einen kleinen, heller leuchtenden Fleck zusammenzieht, so ist die Katodenspitze vor dem Versuch nicht lange oder nicht stark genug geheizt worden, Daher ist die Katode nach Abschalten der Hochspannung kräftig auszuheizen. Tritt dieser Fall hartnäckig auf, so kann der Heizstrom der Katode bis zu 5 min. angelegt werden. Die elektrische Verbindung zwischen dem Anodenanschluß und dem als Anode wirkenden Leuchtschirm erfolgt über den im Innern des Glaskolbens aufgedampften Barium-Film sowie durch Sekundärelektronen. Nach einer längeren Betriebspause kann es nach dem Ausheizen der Spitze erforderlich werden, zunächst Barium zu verdampfen, damit ein Leuchtschirmbild erreicht werden kann.

4.3.2 Aufdampfen von Barium

Der Heizstrom I_{Ba} wird, bei 0 beginnend, auf ca. 7,5 bis 8,0 A eingestellt (evtl. nachstellen). Die Heizdauer ist 30 s bis 60 s.

Bei der Heizprozedur sind die ringförmige Mulde mit Bariumvorrat sowie das Schirmbild zu beobachten: Nach ca. 30 s Heizdauer erkennt man das dunkelrote Glühen des Ringes in dem seitlichen Ansatz des Glaskolbens und bald darauf eine leichte Bewegung innerhalb des grün-leuchtenden Schirmbildes. Nach weiteren Sekunden sieht man eine Anhäufung spontan aufleuchtender heller Punkte rund um die großen dunklen Punkte der Gitterstruktur. Die Heizung des Bariumvorrates muß dann sofort beendet werden.

Der Bariumvorrat ist für weit mehr als 50 Aufdampfungen ausreichend. Nachdem die Spitze mit Barium bedampft ist, kann zum Beobachten der atomaren Temperaturbewegung die Katodenspitze bei angelegter Hochspannung leicht beheizt werden. Dabei stellt man die Heizspannung jedoch nur soweit ein, bis die Bariumatome in kräftige Flimmerbewegung geraten, die **Katode jedoch höchstens schwach dunkelrot glühend wird.**

output if necessary.

4.3 Heating voltage supply

The high-voltage supply for barium heating must have a sufficiently high insulation resistance. The Leybold demonstration transformer is very suitable whereas other transformers generally are not. Ammeters to observe the barium heating current I_{BA} must be arranged on a well-insulated surface, e.g. on a glass plate (664 196).

4.3.1 Baking out the cathode

The cathode must be baked out **when no high voltage is applied to the tube ($U_A = 0$)**. The purpose of baking out is to clean the tungsten tip of all foreign atoms absorbed.

The cathode must be baked out:

- before experimenting with the tube for the first time on any particular day or
- after the end of a demonstration with the barium-coated cathode,
- and whenever this appears to be necessary.

The bake-out operation requires a current of 1.6 to 1.8 A which **must be increased continuously from zero up to the maximum value** and should be maintained at full strength for approx. 1 min.

As the very sensitive tip is easily destroyed, it must be baked out with the utmost care with the following points taken into particular account:

Never apply high voltage and full cathode heating current simultaneously. Eliminate residual charge of the source of high voltage prior to each bake-out.

Never apply the heating current in full strength, but increase gradually under constant observation of the ammeter for I_W ; never exceed the maximum value of 1.9 A.

In the case of abnormal luminous phenomena, switch off high voltage at once and bake out cathode.

If, in the course of operation or when starting up, the luminous area on the screen contracts into a small, bright spot, then the cathode tip has not been baked out long enough or intensely enough prior to the experiment. That is why the cathode must be baked out in the above manner after switching off high voltage. Should this disturbance recur persistently, the cathode heating current may be applied for up to 5 minutes.

Electrical conduction between the anode terminal and the fluorescent screen (acting as the anode) is achieved by vacuum deposition of the barium film within the glass bulb, and via the secondary electrons. When the apparatus has not been put into operation for a longer period of time, it may first be necessary after bake-out of the tungsten tip, to vaporize some barium in order to obtain an image on the screen.

4.3.2 Vacuum deposition of barium

The heating current I_{Ba} is set to approx. 7.5 to 8.0 A starting from 0 (adjust, if necessary). The heating time is 30 s to 60 s.

During the heating procedure observe the ring-shaped trough with barium and the image on the screen. After about 30 s the dark-red glow of the ring becomes visible in the section at the side of the glass bulb, and shortly afterwards a slight movement within the image on the green fluorescent screen. After an additional few seconds many bright points light up, clustered around the large dark points of the lattice structure. The barium heating should now be switched off immediately.

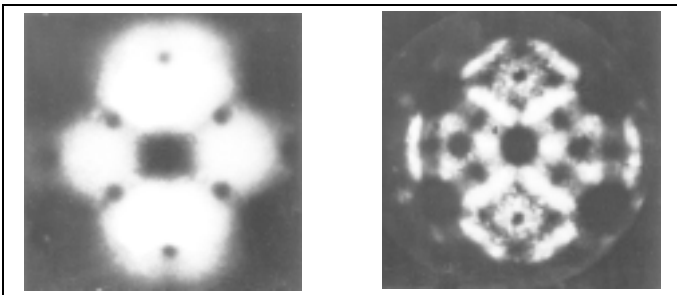
The barium reserve lasts for more than 50 vaporization cycles. After barium has been deposited on the tip, the cathode can be slightly heated while high voltage is on, to observe the thermal agitation of the barium atoms on it. However, the heating voltage should only be increased sufficiently to set the barium atoms in vigorous flickering, the **cathode must never show more than a dull red glow.**

5 Versuche

5.1 Bild der Wolframspitze

Die feine Wolframspitze mit nur 0,1 bis 0,2 μm Radius besteht aus einem Einkristall. Das Wolframgitter ist ein kubisch-raumzentriertes, dessen Elementarwürfel in Fig. 6 dargestellt ist. Seine Kantenlänge beträgt 0,316 nm. Durch den Herstellungsprozess ist die Orientierung der Kristallachsen derart, daß eine Würfeldiagonale in der Längsrichtung der Spitze durch den Zenit ihrer Kalotte geht. Diese Richtung (110) ist in der Fig. 6 gestrichelt angedeutet. Die zur ihr senkrechte Ebene hat nach der kristallographischen Indizierung die Kennzeichnung (110). Aus dieser Ebene treten, wie Fig. 4 und 5 erkennen lassen, nur wenige Elektronen aus, denn in der Mitte des Bildes ist ein dunkler Punkt. Die Austrittsarbeit ist in dieser Richtung etwas größer. Auch die anderen symmetrisch liegenden dunklen Punkte des Elektronenbildes lassen sich den Kristallrichtungen bzw. den Kristallebenen eindeutig zuordnen. Das ist in Fig. 7 in einer Parallelprojektion dargestellt.

Das Bild der Wolframspitze im Feldemissions-Mikroskop vermittelt ein interessantes Kapitel aus der Kristallographie einfacher Gitter. Wie aus dem Unterschied der Fig. 4 und 5 hervorgeht, bewirkt die geringste Oberflächenbewegung bereits eine merkbare Änderung des Emissionsverhältnisse der Katode. Die Änderungen können noch krasser werden, wenn die Katode im elektrischen Feld erwärmt wird. Es treten weitere helle und dunkle Stellen auf dem Leuchtschirm auf. Man lasse sich aber durch diese schönen Erscheinungen nicht dazu verleiten, die Spitze unter Hochspannung bis zur sichtbaren Glut zu heizen. Sie kann dadurch zerstört werden.



5.2 Sichtbarmachung einzelner Atome

Es ist besonders wichtig, daß man auf die Wolframoberfläche Atome und Moleküle anderer Substanzen aufbringen und dort beobachten kann. Hierzu eignen sich Gasatome, die noch im Kolben vorhanden sind, nicht; es müssen möglichst große Teilchen sein. Besonders geeignet sind hier Atome von Barium. Heizt man bei anliegender Hochspannung den Bariumvorrat in der Röhre bis zum Verdampfen, so schlagen sich einige der Atome auch auf der feinen Katodenspitze nieder. Kleine hell leuchtende Punkte blitzen auf dem schon gewohnten Bild der Wolframkatode auf. Wie Schneeflocken fallen sie immer dichter auf die Spitze. Bei diesem Versuch lasse man nicht allzu viel Barium verdampfen, sondern schalte die Beheizung gleich wieder ab. Das diese leuchtenden Punkte Bilder von einzelnen Bariumatomen sind, hat Prof. Dr. E.W. Müller in zahlreichen Versuchen nach verschiedenen Methoden beweisen können.

Die auf der Wolframspitze aufgedampften Bariumatome sind auf den dunkel erscheinenden Flächenbereichen, die vom Wolframkristallgitter herrühren, besonders deutlich zu sehen. So findet man sie z.B. auf dem mittleren dunklen Punkt der [110]-Richtung. Außen am Rande des Blickfeldes treten bei diesem Versuch deutlich die Richtungen [011], [101], [101] und [011] in Erscheinung, die sich an ihrem Rande mit hell leuchtenden Bildern von Bariumatomen umsäumen. Aber auch in den hellen dazwischliegenden Feldern erkennt man deutlich die Bariumatome.

5 Experiments

5.1 Image of the tungsten tip

The fine tungsten tip of only 0.1 to 0.2 μm radius consists of a monocrystal. This metal has a cubic body-centered lattice, the unit cell of which is represented in Fig. 6. The edge of the unit cell is 0.316 nm long. On account of the manner in which the crystal was prepared, the alignment of the crystallographic axes is such that one diagonal of the unit cell lies in the longitudinal direction of the tip and intersects the zenith of the hemisphere. This axis (110) is indicated by a broken line in Fig. 6. The plane perpendicular to it is labelled (110) in accordance with the standard convention for crystallographic indices. As shown in Fig. 4 and 5 only a few electrons emerge from this plane as revealed by the dark patch at the center of the image. In this direction the electron work function is slightly greater. The other, dark patches in the electron image which are arranged symmetrically around the first can also be clearly related to crystal axes and crystal planes. This is represented in a parallel projection in Fig. 7.

The image of the tungsten tip in the field emission microscope opens up an interesting chapter from the crystallography of simple lattices. As follows from the difference between Figs. 4 and 5, even the slightest contamination of the surface causes a noticeable change in the emission conditions of the cathode. These changes can become even more striking when the cathode is heated in the electric field. Then further bright and dark patches appear on the fluorescent screen. However, do not let these interesting phenomena tempt you into heating up the tip to visible glow while high voltage is on, as this can destroy it.

Fig. 4/5
Bild der Wolframspitze
bei kalter Katode (Fig. 4)
bei erwärmter Katode (Fig. 5)
Image of tungsten tip:
cold electrode (Fig. 4);
hot electrode (Fig. 5)

5.2 Imaging individual atoms

It is particularly important that atoms and molecules of other substances can be deposited on the tungsten surface, and observed there. The residual gas atoms present in the bulb are not suitable for these purposes; the particles must be as large as possible. Barium atoms are particularly suitable. When the high voltage is connected to heat up the barium in the tube to vaporization, some of these atoms will precipitate on the fine, point-shaped cathode; small bright points will then flash up on the familiar image of the tungsten cathode. They settle like snowflakes on the tip in growing quantities. During this experiment, not too much barium should be vaporized; the heating should soon be switched off again. That fact that these luminous points are images of individual barium atoms was proven by Professor Dr. E.W. Müller in numerous experiments and using various methods.

The barium atoms that have been vapor-deposited on the tungsten tip can be seen particularly clearly on the parts that have a darker appearance due to the alignment of the tungsten lattice. Thus they appear, for example, on the central dark patch resulting from the [110]-direction. On the outside, near the boundary of the field of vision, the directions [011], [101], [101] and [011] appear very clearly, their edges being fringed with brightly shining images of barium atoms. But in the bright fields between, the barium atoms can also be clearly recognized.

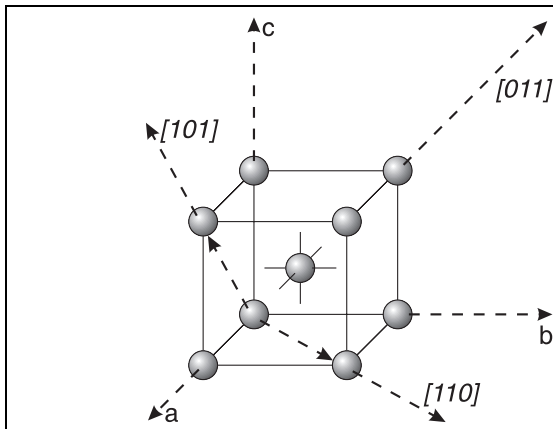


Fig. 6 Elementarzelle des Wolframgitters
Unit cell of tungsten lattice

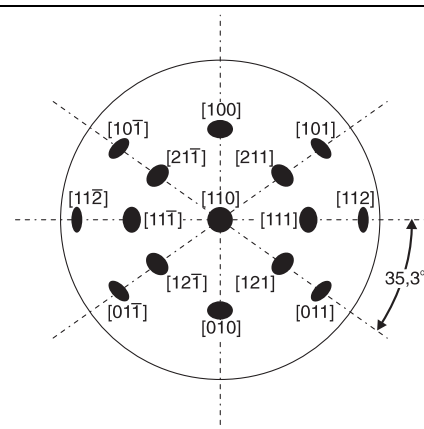


Fig. 7 Die Kristallrichtungen des Wolframgitters auf der Halbkugel des Feldemissions-Mikroskopes, in Parallelprojektion gesehen

The crystallographic directions of the tungsten lattice on the hemispherical tip of the tungsten cathode of the field emission microscope, seen in parallel projection

Wird jetzt der Strom I_W zur Erwärmung der Wolframkatode ganz langsam von 0 V ausgehend erhöht, so kann man die Bewegung der Bariumatome auf den verschiedenen Kristallflächen der Wolframspitze beobachten. Zuerst fangen die Bariumatome auf außen liegenden Teilen des Schirmbildes, später auch im mittleren Bereich an, immer häufiger ihre Plätze zu wechseln. Die seitliche Bewegung selbst ist nicht zu erkennen, weil die Geschwindigkeit viel zu groß ist. Man sieht lediglich das Aufblitzen nach einem solchen Platzwechsel.

Steigert man die Temperatur etwas weiter, so wird die Bewegung der Bariumatome auf den durch die dunklen Flächen gekennzeichneten Ebenen so lebhaft, daß nach kurzem dort keine Bariumatome mehr erkennbar sind. Dann beginnen sich die in den hellen Flächen sichtbaren Bilder von Bariumatomen zu bewegen. Infolge der lebhaften Wärmebewegung können einzelne Bilder nicht mehr getrennt werden. Es erscheint ein lebhaft wimmelndes Leuchten. Bei einer weiteren Steigerung der Temperatur der Katode verschwinden auf den hellen Flächen mehr und mehr die Bariumatome und ziehen sich auf die charakteristischen Punkte zwischen den dunklen Flächen auf dem Leuchtschirmbild zusammen. An diesen Stellen sind die Bariumatome dann in sehr lebhafter Wimmelbewegung. Es ist nicht empfehlenswert, die Temperatur noch weiter zu steigern, da bei dieser letzten Beobachtung die Katode schon schwach dunkelrot-glühend wird.

Die Menge des aufgedampften Bariums kann in einem weiteren Versuch etwas höher getrieben werden. Dabei wird die Hochspannung während der Verdampfung abgeschaltet, damit die an der Spitze vorbeifliegenden Bariumatome nicht durch das elektrische Feld auf die abgewandte Seite der Spitze gezogen werden.

Schaltet man kurze Zeit nach der Bedampfung die Hochspannung wieder ein, so sieht man deutlich, daß die Bariumatome nur auf der dem Bariumvorrat zugewandten Seite niedergeschlagen sind. Sie können dort in mehratomarer Schicht übereinander liegen. Das Bild auf dem Leuchtschirm kennzeichnet sich dann durch einen hell leuchtenden Saum. Dieser rührt von den etwa einatomaren Grenzen der aufgedampften Bariummenge her.

Die größere Bariummenge auf der Wolframkatode kann man nun durch Beheizen zur Verteilung über die ganze Katodenklotte bringen. Auch hier beginnt man mit sehr niedriger Katodenheizspannung und beobachtet, wie die Bariumatome mehr und mehr auf den nicht bedeckten Teil der Klotte hinüberwandern. Die dunklen Stellen des Wolframbildes bleiben bei dieser Wanderung meist völlig dunkel, weil sie von Plätzen herrühren, auf denen sich auch die Bariumatome nicht bevorzugt aufhalten. Das Barium sitzt vielmehr, wie in dem oben beschriebenen Versuch, als fluktuierende Granulation auf den hellen Stellen des Bildes.

If, now, the current I_W for heating the tungsten cathode is increased very slowly, starting from a value of 0 V, then the motion of the barium atoms on the various crystal faces of the tungsten tip can be observed. The barium atoms at the outer parts of the image on the screen are the first to come into motion, then gradually those in the central regions soon begin altering their positions. However, the lateral motion itself cannot be detected due to the high velocity. All that is seen is the flash as an atom settles on the new site.

If the temperature is increased a bit more, the motion of the barium atoms on the planes characterized by the dark faces becomes so vigorous that it soon becomes impossible to identify individual barium atoms. At this stage, the images of barium atoms that are visible on the bright zones will begin to move.

Due to the vigorous thermal agitation individual images cannot be isolated. A restless, swarming glow is seen. On further increase of the cathode temperature the barium atoms disappear more and more from the bright zones and contract to characteristic spots between the dark patches on the image. At these locations barium atoms will then be seen to swarm in great agitation. A further increase of temperature is not recommended, as, during this last observation, the cathode already exhibits a dull red glow.

The quantity of barium deposited on the cathode can be slightly increased in a further experiment. Here, the high voltage should be switched off during vaporization. The object of this measure is to prevent the electric field from attracting those barium atoms which travel past the tip to the opposite side of the tip.

On switching the high voltage on again a short time after depositing the barium atoms, it will be clearly seen that the barium atoms have only settled on the side facing the barium. Here, several layers of atoms may be deposited one on top of the other. The image on the fluorescent screen will then be characterized by a bright luminous edge. This is due to the monoatomic boundaries of the deposited barium patch.

This larger quantity of barium on the tungsten cathode can be distributed all over the hemispherical tip by means of heating. Again, start with a very low cathode heating voltage and observe the motion of the barium atoms across the uncoated part of the hemispherical tip. During this process, the dark parts of the image of the tungsten cathode generally remain completely dark; this is due to the fact that these sites are not preferred by the barium atoms. On the contrary, the barium tends to occupy the bright parts of the image like a fluctuating granulation, as in the previously described experiment.