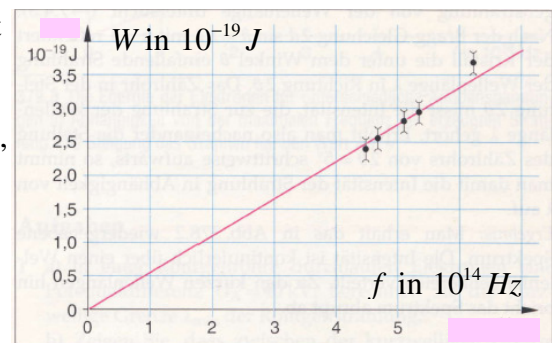
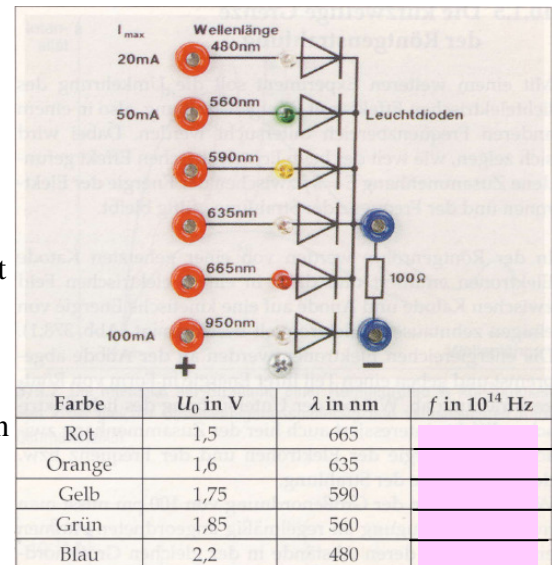


Aufgabe 1) Leuchtdiode

Die Vorgänge in einer Leuchtdiode entsprechen denen in der Röntgenröhre. Sie stellen eine Umkehrung des Lichtelektrischen Effekts dar. Eine Leuchtdiode besteht aus einem n - und einem p -dotierten Kristallteil. Die Teile stehen in Kontakt. Längs der Kontaktfläche bildet sich eine Raumladungszone aus, welche man als einen inneren „Kondensator“ ansehen kann. Der „Plattenabstand“ beträgt etwa $d = 100 \text{ nm}$. Wegen der Polung des „Kondensators“ ist die Grenzschicht für Elektronen in einer Richtung durchlässig und in der anderen Richtung sperrend. Mit der Spannung U_0 in Durchlassrichtung werden die Elektronen innerhalb der Grenzschicht stark beschleunigt. Bei gutem Wirkungsgrad wird die Energie letztlich überwiegend zu elektromagnetischer Strahlung, also zu Licht.

Das abgebildete Schaltbrett enthält Leuchtdioden für Licht unterschiedlicher Farben. Die Dioden werden einzeln nacheinander von unten nach oben mit einer regelbaren Spannung angesteuert. Die Spannung wird so lange erhöht, bis die jeweilige Diode leuchtet. Ergebnis: Die unterschiedlichen Farben benötigen unterschiedliche Spannungen, dargestellt in der Graphik.



Aufgaben

- Schätze die Feldstärke E in der Grenzschicht ab.
- Stelle dar, wie in der Grenzschicht die Energie W_{el} in Lichtenergie W_{ph} umgewandelt wird.
- Berechne die Frequenzen in der 4. Spalte der Tabelle und fülle sie in eine neue Tabelle ein.
- Berechne und tabelliere die Energiewerte W , die in der Graphik auf der y -Achse abgetragen sind.
- Bestätige, die Richtigkeit der angegebenen Graphik.
- Aus dem y -Achsenabschnitt und der Steigung der Geraden lassen sich Informationen gewinnen. Ermittle diese Informationen und interpretiere die Ergebnisse.

Lösung:

- a) Die Strecken von den äußeren Anschlüssen der Leuchtdiode bis zur Raumladungsschicht setzen dem Strom nur einen sehr kleinen ohmschen Widerstand entgegen und können deshalb als Zuleitungen oder Adern angesehen werden. Damit liegt an dem inneren „Kondensator“ praktisch die volle von außen angelegte Spannung U_0 .

Die Feldstärke ist enorm, für die Spannung $U_0 = 1,5V$ beträgt sie $E = U_0 / d = 15MV / m$.

- b) Die elektrische Energie $W_{el} = e \cdot U_0$ ist zwar von d unabhängig, aber nur wenn d gering ist, können Stöße der Elektronen mit Atomen auf der Beschleunigungsstrecke vermieden werden. Nur so kann die potentielle Energie weitgehend in kinetische umgewandelt werden. Am Ende kommt es dann doch zu einem Stoß. Dabei wird die kinetische Energie jedes einzelnen Elektrons, wie in der Röntgenröhre, nach dem 1 zu 1 Prinzip in *ein* Photon mit der Energie $W_{ph} = W_{kin} = W_{pot}$ verwandelt. Man fragt sich, warum eine Glühlampe, welche mit $U = 220V$ betrieben wird, auch nur sichtbares Licht der Wellenlänge $\lambda \approx 500nm$ abgibt, was die Leuchtdiode mit $\approx 2V$ schafft. Die Antwort: Es gibt so viele Abbremsungen durch Stöße, dass die Elektronen letztlich nicht schneller werden, wie sie es in der winzigen Raumladungsschicht der Leuchtdiode werden.

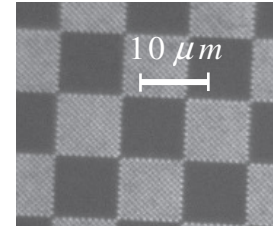
- c) und d) $W_{el} = e \cdot U_0$.

Farbe	U_0 in V	W_{el} in $10^{-19} J$	λ in nm	f in $10^{14} Hz$	W_{ph} / f in $10^{-34} Js$
Rot	1,5	2,4	665	4,51	5,32
Orange	1,6	2,56	635	4,72	5,42
Gelb	1,75	2,8	590	5,08	5,50
Grün	1,85	2,96	560	5,36	5,53
Blau	2,2	3,52	480	6,25	5,63

- e) Richtigkeit bestätigt.
- f) Der Achsenabschnitt der Gerade ist offensichtlich gleich null. So ist es auch bei der Röntgenröhre. Leuchtdiode und Röntgenröhre sind Umkehrungen des Fotoeffektes, denn hier wird elektrische Energie in Licht verwandelt und beim Fotoeffekt ist es umgekehrt. Doch das Gegenstück zur Ablösearbeit W_A fehlt. Die Gerade ist, wie auch bei der Röntgenröhre, eine *Nullpunktsgerade*. Die Steigung, welche man aus der letzten Spalte der Tabelle entnimmt, liefert auch hier, mit der entsprechenden experimentellen Ungenauigkeit, das Plancksche Wirkungsquantum h . Die Formel lautet nämlich wie bei der Röntgenröhre $W_{ph} = e \cdot U = h \cdot f$.

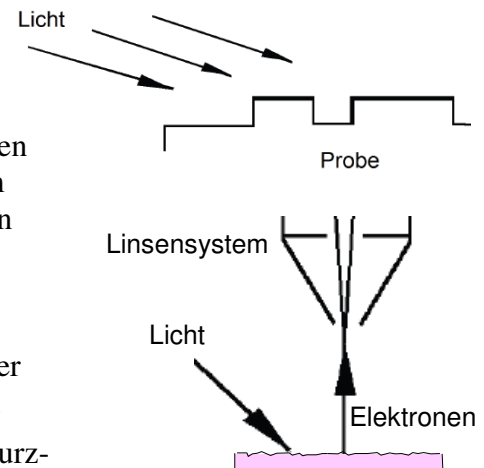
Aufgabe 2) Mikroskopieren mit Photoelektronen

Mit der **Photoemissionselektronenmikroskopie** (PEEM) werden metallische Oberflächen untersucht. Die Proben werden dabei jeweils mit einem parallelen Bündel von monochromatischem (einfarbigem) Licht bestrahlt. Reicht die Frequenz, so werden Elektronen emittiert. Wie in einem Elektronenmikroskop werden diese durch eine Elektronenoptik, bestehend aus geeigneten Magnetfeldern, auf einen Bildschirm projiziert und so sichtbar gemacht.



Wesentlich ist eine schräge Beleuchtung unter kleinem Winkel. Vertiefungen liegen im Schattenbereich und werden kaum bestrahlt. So entstehen die Kontrastunterschiede.

Die Braunsche Röhre hat eine Elektronenrückleitung vom Bildschirm zur Glühkathode. Dadurch wird eine Aufladung vermieden und „dieselben“ Elektronen können erneut von der Kathode zum Bildschirm fliegen. Bei der PEEM ist es genauso. Die emittierten Elektronen werden vom Schirm zur Probe zurück geleitet.



Aufgaben

- Erläutere das Photonenmodell des Lichtes. Erkläre, wie bei der PEEM Elektronen aus dem Probenmaterial ausgelöst werden.
- Der Fotoeffekt wird mit der offenen Schaltung und mit der Kurzschlusschaltung untersucht. Gib an, welche Größe der emittierten Elektronen mit der jeweiligen Schaltung gemessen wird.
- Diskutiere, welche der beiden Schaltungen der Vorgehensweise bei der PEEM entspricht.
- Die Abb. am Anfang der Aufgabe zeigt eine strukturierte Siliziumoberfläche, auf welche eine extrem dünne Goldschicht aufgedampft wurde. Gold hat die Austrittsarbeit $W_A = 4,71 \text{ eV}$.
 - Erkläre, warum die Siliziumstruktur beschichtet wurde, um sie mit PEEM sichtbar zu machen.
 - Zeige, dass Licht der Wellenlänge $\lambda = 200 \text{ nm}$ für die Untersuchung geeignet ist.
 - Berechnen die maximale Geschwindigkeit der emittierten Elektronen.
- Erkläre, warum durch die Beleuchtung der Oberfläche unter sehr kleinem Winkel erfolgt.
- Begründe warum PEEM - Untersuchungen extrem saubere Oberflächen erfordern. Diskutiere, wie sich eine Intensitätserhöhung bzw. eine Frequenzänderung des verwendeten Lichtes auf den elektrischen Strom der Photoelektronen und das Bild auswirken.

Lösungen

- Planck entdeckte, dass die Schwingungsamplituden der Innenwand des Schwarzen Strahlers quantisiert sein müssen, um die UV-Katastrophe zu vermeiden. Die tatsächlichen Bewegungen der Oszillatoren sind dann die Sprünge über die verbotenen Amplituden hinweg. Die Oszillatorenergie ändert sich dabei jeweils um $\Delta W = h \cdot f$. Dabei ist $f = (1/2\pi) \cdot \sqrt{D/m}$ die Frequenz, mit welcher der klassisch mechanische Oszillator der Masse m und der Federkonstanten D schwingt. Einstein konnte diese Vorstellung auf die elektromagnetische Lichtwelle übertragen, da diese Welle auch ein schwingendes Gebilde ist. Die Energie der Amplitudensprünge $\Delta W = h \cdot f$ enthält jetzt jedoch die Frequenz f der Lichtwelle, die durch das Beugungsgitter experimentell ermittelt werden kann. Die Frequenz f entspricht der Farbe des Lichtes. Da beim Amplitudensprung der EM-Welle dasselbe abgestrahlt wird, was der elektromagnetische Oszillator selber ist, „zerbröselt“ die Welle in Energieportionen $W = h \cdot f$. Diese Portionen nennt man Photonen. Mit dem 1 zu 1 Prinzip konnte Einstein so das Hallwachsexperiment = Fotoeffekt erklären. Bei PEEM findet ein entsprechender Vorgang statt.

- b) Bei der Kurzschlusschaltung wird der Wert des Fotostromes in Ampere bzw. Milliampere usw. gemessen. Die kinetische Energie der emittierten Elektronen spielt bei Kurzschlusschaltung keine Rolle. Es werden praktisch alle auch noch so langsamen Elektronen, welche aus der Oberfläche austreten, zur Spitze des PEEM Gerätes gelangen. Das liegt an der Feldfreiheit, die durch die Rückleitung gewährleistet ist.
Bei der offenen Schaltung mit fehlender Rückleitung würde die kinetische Energie der emittierten Elektronen als Spannung zwischen der Probe und der PEEM Spitze gemessen.
- c) Die PEEM entspricht der Kurzschlusschaltung. Bei der PEEM ist die offene Schaltung nicht nutzbar. Zwischen Probe und Mikroskop würde sich ein Gegenfeld aufbauen, welches den Elektronenstrom nach kurzer Zeit blockieren würde.
- d) Gold hat die Austrittsarbeit $W_A = 4,71 eV$. Zur Umrechnung in Joule multipliziert man mit der Maßzahl $1,6 \cdot 10^{-19}$ der Elementarladung e . Das ergibt $W_A = 7,536 \cdot 10^{-19} J$.
- Silizium ist ein Halbleiter. Für die Fotoemission braucht man Metall. Deshalb die Beschichtung z.B. mit Gold. Die Goldschicht muss aber dünn sein, damit die Struktur sichtbar bleibt.
 - Zur Wellenlänge $\lambda = 200 nm$ gehört die Frequenz $f = c / \lambda = 1,5 \cdot 10^{14} Hz$. Somit hat jedes einzelne Photon der Lichtwelle die Energie $W_{ph} = 9,94 \cdot 10^{-19} J$. Der Wert überschreitet die Ablösearbeit $W_A = 7,536 \cdot 10^{-19} J$. Somit können Elektronen austreten und für jedes getroffene Elektron bleibt die kinetische Energie $W_{kin} = 2,4 \cdot 10^{-19} J$ übrig.
 - Es gilt $W_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2$, wobei $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} kg$ die Masse eines Elektrons ist.
Umstellen nach v ergibt $v = \sqrt{2 \cdot W_{kin} / m_e}$. Einsetzen ergibt $v = \underline{\underline{7,27 \cdot 10^5 m/s}}$.
- e) Bei kleinem Winkel fällt das Licht streifend auf die Oberfläche, so dass Kanten viel stärker beleuchtet werden als Flächenteile die parallel zum Untergrund oder gar abgewandt sind. Da die PEEM - Methode eine Kurzschlusschaltung ist, welche die Stärke des Photostroms misst, zählt nur die Strahlungsintensität: Je größer die Intensität, desto mehr Photonen fallen pro Sekunde auf die Fläche und umso mehr Elektronen werden wegen des 1 zu 1 Prinzips ausgelöst. Daher ist die Stärke des Fotostroms direkt proportional zur Strahlungsintensität. Von gut bestrahlten Bereichen der Probenoberfläche geht daher ein deutlich größerer Elektronenstrom aus, als von schlecht beleuchteten. Die schräge Beleuchtung erlaubt deshalb eine strukturierte Abbildung der Oberfläche.
- f) Gibt es Bereiche mit Fremdatomen auf der Oberfläche, so werden auch diese Bereiche abgebildet. Doch das will man nicht.
Ist die Ablösearbeit für die Schmutzbereiche größer als W_{ph} , so bleiben sie dunkel.
Eine Intensitätserhöhung lässt das Bild insgesamt heller werden.
Bei einer Frequenzänderung zu einem Wert mit $h \cdot f < W_A$ unterbleibt die Fotoemission und das Bild verschwindet.
Bei einer Frequenzänderung zu einem Wert mit $h \cdot f > W_A$ ändert sich im Wesentlichen nichts. In der technischen Durchführung könnte jedoch eine Beleuchtung mit sehr hoher Frequenz die Bildqualität insofern verbessern, dass emittierten Elektronen, die ansonsten „auf Abwege“ gelangen, doch noch den Weg zur Aufnahmespitze des Gerätes finden.