

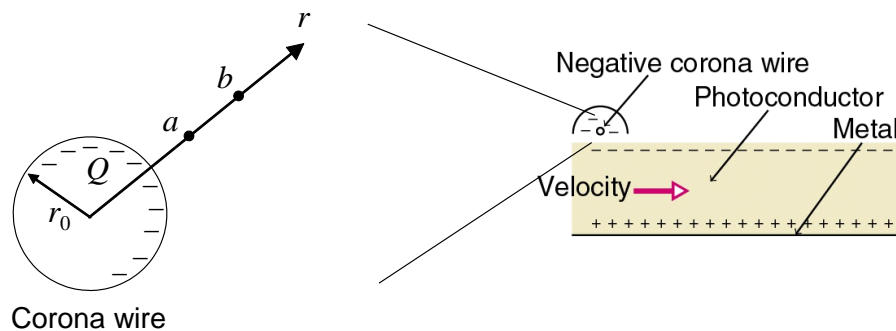
## Tentamen Natuurkunde van Moderne Technologie (NAITEN-10)

8 april 2011, 14.00 – 17.00 uur

Maak ieder van de 3 opgaven op een apart blad en zet op ieder blad je naam en studienummer. Vermeld op blad 1 duidelijk het totale aantal bladen dat je inlevert.

### Vraagstuk 1

Een essentieel onderdeel van de xerografische printtechniek is de ‘corona wire’ (coronadraad) waarmee de fotogeleider van statische elektriciteit wordt voorzien (zie de figuur hieronder). Een coronadraad kan worden beschouwd als een cilindrische



geleider met lengte  $L$ , cirkelvormige dwarsdoorsnede met straal  $r_0$  en een lading  $Q$ . Het elektrische veld voor  $r > r_0$  staat loodrecht op het oppervlak van de draad en kan worden beschreven door

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{r},$$

waarbij  $\lambda = Q/L$  de ladingsdichtheid en  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$  de permittivity of free space.

- 5p a) Bepaal het elektrisch potentiaalverschil  $V_b - V_a$  tussen de punten  $a$  en  $b$  (met straal  $r_a$  en  $r_b$ , respectievelijk, zie figuur).
- 3p b) Neem aan dat  $V = \lambda / 2\pi\epsilon_0$  aan het oppervlak van de draad (i.e.  $r = r_0$ ). Laat zien dat dan de potentiaal voor een willekeurig punt  $r > r_0$  geschreven kan worden als

$$V = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \left( 1 + \ln\left(\frac{r_0}{r}\right) \right).$$

- 2p c) Een elektron bevindt zich aan het oppervlak van de draad (i.e.  $r = r_0$ ). De draad heeft een lengte  $L = 1 \text{ cm}$ , straal  $r_0 = 50 \mu\text{m}$  en  $Q = -1 \times 10^{-11} \text{ C}$ . Bepaal de grootte en richting van de elektrostatische kracht die het elektron ondervindt [ $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ ].
- 5p d) Als gevolg van deze kracht versnelt het elektron, vanuit rust, weg van de draad. Bepaal de snelheid van het elektron als het zich op een afstand van  $2r_0$  van het oppervlak van de draad bevindt (maak hierbij gebruik van behoud van mechanische energie). Het elektron heeft een massa  $m = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ .
- 3p e) Als het elektrische veld rond de draad zeer groot wordt zullen vrije elektronen in de lucht een dusdanige versnelling ondervinden dat de lucht ‘breekt’ (geïoniseerd raakt) en hierdoor geleidend wordt. Bepaal de hoeveelheid lading  $Q$

die de draad moet bevatten voordat dit gebeurt. Bij welke lading gebeurt dit als de draad twee keer zo dik is?

- 2p f) Beschrijf tenslotte in maximaal 10 zinnen het proces waarmee de coronadraad een continue uitstroom van elektronen kan produceren. Dit proces zorgt ervoor dat de fotogeleider van een uniforme laag statische elektriciteit wordt voorzien.

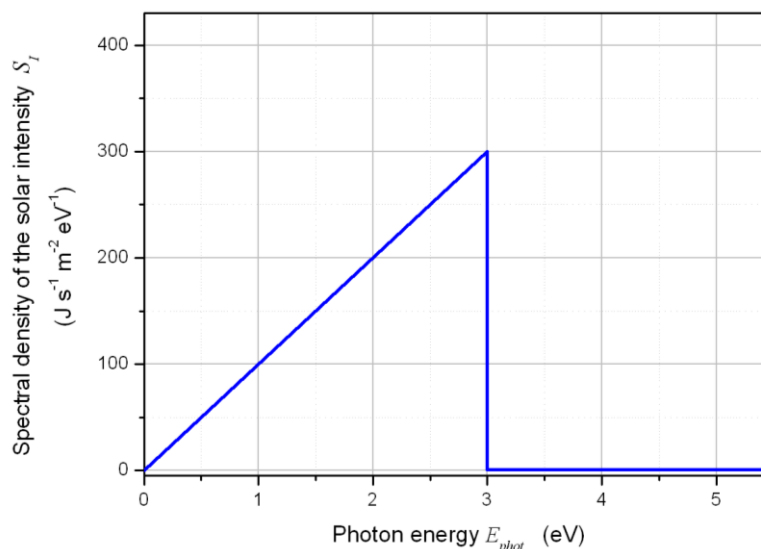
## Vraagstuk 2

### Vraag 2.1 - Kennis vragen over halfgeleiders en zonnecel materialen

- 2p a) Geeft uitleg over het volgende in ongeveer 10 regels tekst:  
Wat is het verschil tussen deze drie types halfgeleidermateriaal:  
1) intrinsiek; 2) *p*-type; 3) *n*-type.  
Je uitleg moet onder andere ingaan op de elektrische weerstand (d.w.z. de materiaaleigenschap soortgelijke weerstand), en hoe elektrische stroom plaatsvindt in deze materialen.
- 2p b) Geeft uitleg over het volgende in ongeveer 10 regels tekst:  
Waarom moet een zonnecel op basis van halfgeleidermateriaal bestaan uit een *p*-type laag en een *n*-type laag boven op elkaar (zodat het systeem een *pn*-junctie vormt).

### Vraag 2.2 - Vraag over de efficiëntie van zonnecellen

Ingenieurs zijn bezig met de ontwikkeling van een nieuwe zonnecel. Het doel is om een zonnecel te maken die een langere levensduur heeft, door te voorkomen dat er materiaalschade optreedt door de ultra-violet (UV) straling in het zonlicht. In deze vraag moet jij een bijdrage leveren door te berekenen wat de maximale efficiëntie is die dit type zonnecel kan hebben. Het gaat om een zonnecel op basis van een enkele soort halfgeleidermateriaal met een *pn*-junctie, met een zekere waarde voor de *bandgap*  $E_{gap}$ . De ingenieurs hebben al vastgesteld dat het cruciaal is om een UV-blokkerende laag aan te brengen bovenop de halfgeleider. Deze UV-blokkerende laag laat geen fotonen door met fotonenergieën boven de waarde  $E_{cut} = 3$  eV, en deze laag is transparant voor fotonen met lagere fotonenergieën. Het is jouw taak om de waarde te vinden voor de *bandgap* ( $E_{gap}$ ) die de zonnecel de hoogste efficiëntie geeft. Hieronder ga je daar stap voor stap aan werken via enkele deelvragen.



De bovenstaande grafiek geeft  $S_I$ , de spectrale dichtheid van de intensiteit van het zonlicht (*spectral density of the intensity of the sun light*) na het filteren met de UV-blokkerende laag (de grafiek is een *smoothed* resultaat van de echte meetresultaten, zodat we het wat makkelijker kunnen gebruiken in de berekening). Voor alle testen geldt dat de intensiteit van het ongefilterde zonlicht  $1000 \text{ W/m}^2$  is.

2p a) Gebruik deze grafiek om de intensiteit  $I_{sol}$  van het zonlicht te berekenen die beschikbaar is na het filteren met de UV-blokkerende laag (d.w.z. bereken hoeveel energie van de zon per seconde arriveert op een gebied van  $1 \text{ m}^2$ ).

Hint: je moet integreren over alle spectrale bijdragen.

1p b) Je mag aannemen dat elk foton dat wordt *geabsorbeerd* in het halfgeleidermateriaal wordt omgezet in elektrische energie (dit is niet helemaal realistisch). Hoe veel elektron-gat paren (*electron-hole pairs*) worden er gemaakt per foton? Is er hierbij een afhankelijkheid van de fotonenergie  $E_{phot}$ ?

2p c) Voor deze berekening heb je de spectrale dichtheid (*spectral density*) nodig van het aantal fotonen dat per seconde en per  $\text{m}^2$  aankomt in het halfgeleidermateriaal. Gebruik hiervoor het symbool  $S_N$ . De relatie tussen  $S_N$  en  $S_I$  is

$$S_N(E_{phot}) = \frac{S_I(E_{phot})}{E_{phot}}.$$

Leid deze relatie af of leg hem uit in ongeveer 5 regels tekst.

2p d) Gebruik de relatie uit vraag 2.2c) om het spectrum  $S_N$  te berekenen, en teken een grafiek van  $S_N$ . Hint: schrijf eerst een analytische uitdrukking op voor het spectrum  $S_I$  in de figuur hierboven, voor het deel  $0 < E_{phot} < E_{cut}$  (waarbij  $E_{cut} = 3 \text{ eV}$ ). Gebruik voor een constante in deze uitdrukking het symbool  $C$ .

3p e) Bereken nu hoeveel elektrisch vermogen geleverd kan worden door een zonnecel van dit type met een oppervlakte  $A = 1 \text{ m}^2$ . Je mag aannemen dat de zonnecel een elektrische stroom  $I$  levert waarin elk elektron zit dat is geëxciteerd in het halfgeleidermateriaal (niet geheel realistisch). De stroom wordt met een spanning  $V$  geleverd aan een toepassing. Je moet ook aannemen dat alle elektron-gat paren die worden geëxciteerd door een foton met  $E_{phot} > E_{gap}$  zeer snel relaxeren terwijl ze nog in de zonnecel zijn. Elektronen relaxeren naar de onderkant van de geleidingsband (*conduction band*), gaten relaxeren naar de bovenkant van de valentieband (*valence band*). Je kunt dus aannemen dat  $V = E_{gap}/e$ . De optimale waarde van  $E_{gap}$  is nog niet bekend, maar experimenten hebben al aangetoond dat voor deze optimale waarde  $0 \text{ eV} < E_{gap} < E_{cut}$  (waarbij  $E_{cut} = 3 \text{ eV}$ ). Geef een uitdrukking voor het elektrische vermogen  $P_{el}$  als functie van  $E_{gap}$  en de andere parameters die al zijn gegeven.

Hint: de eenheid van  $S_N$  is  $\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ eV}^{-1}$ , dus je moet integreren over de fotonenergieën  $E_{phot}$ , en vermenigvuldigen met oppervlakte  $A$  en de elektronlading  $e$  om van  $S_N$  naar de stroom  $I$  te komen.

3p f) Gebruik het resultaat van 2.2e) om de waarde van  $E_{gap}$  te berekenen die een maximum geeft voor  $P_{el}$ .

3p g) Wat is voor het resultaat van 2.2f) de waarde van  $P_{el}$ , en wat is bij deze waarde de efficiëntie van deze zonnecel?

### Vraagstuk 3

- 5p a) De pupil van het menselijk oog is bij bescheiden verlichting ca. 2 mm in diameter. Beschouw het oog als een telescoop. Bereken (met het Rayleigh criterium) de limiet in hoekoplossend vermogen van het oog. Wat is de maximale afstand tot het oog waarbij op een schaalverdeling nog net de millimeters onderscheiden kunnen worden? Is het oplossend vermogen van het oog hoger bij veel of matig licht? Is de scherptediepte van het oog groter bij veel of matig licht?
- 3p b) Welk type lensaberratie limiteert de resolutie van Transmissie Elektronen Microscopen? Leg goed uit hoe deze aberratie werkt (laat bijvoorbeeld stralengangen zien).
- 4p c) Een beperkende factor bij magnetische geheugens (in bijvoorbeeld harde schijven) is de superparamagnetische limiet. We kunnen die limiet bij steeds kleinere domeinen leggen als het materiaal magnetisch steeds harder wordt. Een zacht magnetisch materiaal wordt juist in transformatoren gebruikt. Laat de typische hystereselussen (waarbij de magnetisatie van het materiaal  $M$  is uitgezet tegen het externe magneetveld  $H$ ) van harde en zachte magnetische materialen zien (waarbij overeenkomst en verschil tussen hard en zacht goed duidelijk worden). Hoe harder het magnetische materiaal is, des te moeilijker wordt het op b.v. een harde schijf om data te schrijven (of te wissen). Wat zou een goede oplossing zijn om dit probleem te ondervangen?
- 3p d) Röntgenfoto's (in het ziekenhuis) geven contrast door het foto-elektrisch effect, terwijl Röntgenbestraling voor het bestrijden van kanker juist gebruik maakt van Compton *scattering* (verstrooiing). Leg uit wat de overeenkomsten en verschillen zijn tussen het foto-elektrisch effect en Compton scattering.
- 5p e) Protonentherapie heeft de potentie om veel effectiever te zijn dan de bestraling met fotonen die nu standaard wordt gedaan. Welke snelheid hebben protonen en fotonen voordat ze het lichaam raken wanneer de fotonen een energie van 15 MeV hebben en de protonen versneld worden met energie van 150 MeV (let op: deze energie komt bovenop de energie  $m_0c^2$  van de protonen met  $m_0$  de rustmassa van protonen en  $c$  de lichtsnelheid. De totale relativistische energie van de protonen is dus  $150 \text{ MeV} + m_0c^2$ );  $m_0$  is  $1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ,  $c$  is  $3.00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ , de constante van Planck  $h$  is  $4.14 \cdot 10^{-15} \text{ eV s}$  of  $6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$  en de eenheidslading  $e$  is dus  $1.60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .