

Textos Explicativos

Componentes Fotoelétricos

Material de apoio para a Lista de Exercícios — Efeito fotoelétrico aplicado a dispositivos: fotorresistores, fotodiodos, fototransistores, células fotovoltaicas e sensores de imagem

1. O Efeito Fotoelétrico como Base de Todos os Componentes Fotoelétricos

Questão relacionada: 1

O efeito fotoelétrico é o fenômeno físico em que elétrons são ejetados (ou liberados internamente) da superfície de um material — geralmente um metal ou um semicondutor — ao serem atingidos por luz (fótons) de energia suficiente. Esse fenômeno é descrito pela equação de Einstein do efeito fotoelétrico:

$$h \cdot f = W + E_{c_max}$$

Nessa fórmula, $h \cdot f$ é a energia do fóton incidente (h é a constante de Planck e f é a frequência da luz), W é a função trabalho do material (a energia mínima necessária para libertar um elétron) e E_{c_max} é a energia cinética máxima do elétron ejetado.

Esse mesmo princípio físico é a base de funcionamento de todos os componentes fotoelétricos estudados nesta lista: em um fotorresistor, a luz incidente libera portadores de carga que alteram a resistência elétrica do material; em uma célula fotovoltaica, a energia dos fótons libera elétrons que geram uma corrente elétrica; e em um sensor de imagem, cada fóton incidente sobre um pixel libera cargas elétricas que são convertidas em um sinal digital, formando a imagem captada.

2. Calculando a Energia de um Fóton a partir do Comprimento de Onda

Questão relacionada: 2

A energia de um fóton de luz pode ser calculada a partir de seu comprimento de onda λ , usando a constante de Planck (h) e a velocidade da luz (c), já que frequência e comprimento de onda estão relacionados por $c = \lambda \cdot f$:

$$E = h \cdot c / \lambda$$

Exemplo prático: um fotodiodo é iluminado por luz de comprimento de onda $\lambda = 500 \text{ nm} = 500 \times 10^{-9} \text{ m}$. Usando $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ e $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, a energia de cada fóton incidente é $E = (6,63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8) / (500 \times 10^{-9}) = (1,989 \times 10^{-25}) / (5 \times 10^{-7}) \approx 3,978 \times 10^{-19} \text{ J}$, o que equivale a aproximadamente 2,49 eV (considerando $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$).

3. O Fotorresistor (LDR) em um Circuito Divisor de Tensão e sua Aplicação em Alarmes

Questões relacionadas: 3 e 8

Um fotorresistor, ou LDR (Light Dependent Resistor), é um componente cuja resistência elétrica varia de acordo com a intensidade de luz incidente sobre ele: no escuro, sua resistência é alta; sob luz intensa, sua resistência cai bastante. Para transformar essa variação de resistência em um sinal de tensão que um circuito possa interpretar, o LDR costuma ser associado a um resistor fixo, formando um circuito divisor de tensão:

$$U_{LDR} = U_{fonte} \cdot R_{LDR} / (R_{LDR} + R_{fixo})$$

Exemplo prático: um LDR tem resistência de $50 \text{ k}\Omega$ no escuro e $200 \text{ }\Omega$ sob luz intensa, ligado em série com um resistor fixo de $1 \text{ k}\Omega$ a uma fonte de 9 V . No escuro, $U_{LDR} = 9 \times 50000 / (50000 + 1000) = 9 \times 0,9804 \approx 8,82 \text{ V}$. Sob luz intensa, $U_{LDR} = 9 \times 200 / (200 + 1000) = 9 \times 0,1667 \approx 1,50 \text{ V}$ — uma variação de tensão grande o suficiente para ser detectada facilmente por um circuito de controle.

É exatamente essa variação de tensão que torna o LDR útil em sistemas de alarme: um feixe de luz incide continuamente sobre o LDR, mantendo sua resistência baixa (estado de luz) e o circuito em um determinado estado, por exemplo desarmado. Quando uma pessoa passa pelo local monitorado e interrompe o feixe de luz, a luz deixa de incidir sobre o LDR, sua resistência aumenta bruscamente (estado de escuro) e a tensão no circuito se altera — essa alteração é detectada pelo circuito eletrônico de controle e usada para acionar o alarme.

4. Fotodiodo × Fototransistor: o Efeito de Amplificação

Questão relacionada: 4

O fotodiodo converte a luz incidente diretamente em uma pequena corrente elétrica, proporcional à intensidade luminosa, sem qualquer amplificação interna. O fototransistor, por sua vez, incorpora internamente um estágio de amplificação: a corrente gerada pela luz na sua junção fotossensível atua como a corrente de base de um transistor, que é amplificada pelo ganho (β) do próprio transistor antes de chegar à saída.

É por isso que, para a mesma quantidade de luz incidente, o fototransistor produz um sinal elétrico de saída bem maior do que o fotodiodo — a diferença central entre os dois componentes não está em como a luz é convertida em corrente elétrica (o princípio, o efeito fotoelétrico, é o mesmo), mas em o fototransistor amplificar internamente esse sinal antes de entregá-lo ao restante do circuito.

5. Células Fotovoltaicas: Cálculo da Potência Elétrica Gerada

Questão relacionada: 5

Uma célula fotovoltaica (painel solar) converte parte da energia luminosa que recebe (a irradiância solar, medida em watts por metro quadrado) em energia elétrica. Nem toda a energia recebida é convertida: apenas uma fração dela, dada pela eficiência de conversão da célula. A potência elétrica gerada pode ser calculada por:

$$P = \text{irradiância} \cdot \text{área} \cdot \text{eficiência}$$

Exemplo prático: uma célula fotovoltaica de área $0,5 \text{ m}^2$ recebe irradiância solar de 800 W/m^2 e tem eficiência de conversão de 18%. A potência elétrica gerada é $P = 800 \times 0,5 \times 0,18 = 72 \text{ W}$.

6. Sensores de Imagem CCD e o Efeito Fotoelétrico Interno

Questão relacionada: 6

Um sensor de imagem CCD (Charge-Coupled Device), usado em câmeras digitais, tem sua superfície dividida em uma matriz de pequenas células fotossensíveis (pixels), cada uma feita de material semicondutor. Ao incidir sobre um pixel, a luz libera elétrons no material semicondutor por efeito fotoelétrico interno, gerando uma quantidade de carga elétrica proporcional à intensidade de luz recebida naquele ponto — de forma semelhante ao que ocorre em um fotodiodo, mas organizado em uma grade de milhares (ou milhões) de pontos sensíveis.

Essas cargas são então transferidas ('acopladas por carga', daí o nome CCD) sequencialmente até um circuito de leitura, que converte a carga acumulada em cada pixel em um valor digital — reconstruindo, ponto a ponto, a imagem capturada pela câmera.

7. Função Trabalho e a Condição para a Emissão de Elétrons

Questões relacionadas: 7 e 9

A função trabalho (W) de um material é a energia mínima necessária para que um elétron seja ejetado de sua superfície pelo efeito fotoelétrico. Para que a emissão ocorra, a energia do fóton incidente precisa ser maior que essa função trabalho; a energia que sobra, além do mínimo necessário para libertar o elétron, se transforma em energia cinética do elétron ejetado:

$$E_{c_max} = E_{\text{fóton}} - W$$

Exemplo 1 — cálculo direto: uma célula fotoelétrica de vácuo (fototubo) tem um catodo metálico com função trabalho $W = 2,0 \text{ eV}$, iluminado por fótons de energia $3,5 \text{ eV}$. A energia cinética máxima dos elétrons ejetados é $E_{c_max} = 3,5 - 2,0 = 1,5 \text{ eV}$. Como $E_{c_max} > 0$ (a energia do fóton é maior que a função trabalho), haverá, sim, emissão de elétrons.

Exemplo 2 — escolha de material: dois materiais fotossensíveis, A e B, têm funções trabalho $W_A = 1,8 \text{ eV}$ e $W_B = 4,5 \text{ eV}$. Um sensor precisa detectar luz visível, cujos fótons têm energia entre aproximadamente $1,8 \text{ eV}$ e $3,1 \text{ eV}$. O material A é o mais adequado: sua função trabalho ($1,8 \text{ eV}$) é igual ao limite inferior dessa faixa, permitindo que o efeito fotoelétrico ocorra para praticamente toda a luz visível relevante. Já o material B é inadequado, pois nenhum fóton de luz visível (energia máxima de aproximadamente $3,1 \text{ eV}$) tem energia suficiente para superar sua função trabalho de $4,5 \text{ eV}$ — ou seja, o efeito fotoelétrico simplesmente não ocorreria com luz visível nesse material.

8. Comparando as Aplicações dos Componentes Fotoelétricos

Questão relacionada: 10

Embora todos os componentes fotoelétricos estudados nesta lista compartilhem o mesmo princípio físico de base — o efeito fotoelétrico —, cada aplicação explora uma grandeza física diferente como resultado desse efeito. Nos sensores de luminosidade com LDR, a grandeza física de interesse é a variação da resistência elétrica do material em função da intensidade de luz incidente. Nos painéis fotovoltaicos, a grandeza de interesse é a geração de energia elétrica (corrente e tensão) a partir da energia luminosa absorvida. Já nos sensores de imagem CCD/CMOS, a grandeza de interesse é a formação de uma imagem, obtida a partir da distribuição espacial das cargas elétricas geradas pixel a pixel pela luz incidente sobre o sensor.

Essa comparação mostra como um mesmo fenômeno físico fundamental pode dar origem a aplicações tecnológicas bastante diferentes entre si, bastando explorar de que forma a energia liberada pelos fótons incidentes se manifesta em cada tipo de material e de dispositivo.