

Fotocondutividade

Tecnologia dos Materiais 2024.2

12.03.2025

Aluno: Henrique Pedro da Silva

Professor: Edval J. P. Santos, PhD

Repositório: https://github.com/shapis/ufpe_ee/

Sumário

1	Introdução e Motivação	5
1.a	Introdução	6
1.b	Motivação	7
2	Intuição Física	8
2.a	Sem Luz	9
2.b	Com luz	10
2.c	Interrupção da luz	11
3	Experimento de Willoughby Smith	12
3.a	Descoberta da fotosensitividade no Selênio.	13
3.b	Hipótese de Willoughby Smith	14
3.c	Hipótese de Willoughby Smith	15
3.d	Equipamentos Utilizados na Época	16
3.e	Preparação do Circuito	17
3.f	Medição da Condutividade Sem Luz	18
3.g	Exposição à Luz e Medição	19
3.h	Impacto da Descoberta	20

Sumário (ii)

4	Formalismo Matemático	21
4.a	Considerações Iniciais	22
4.b	Distribuição de Fermi-Dirac	23
4.c	Semicondutores Intrínsecos	24
4.d	Geração de portadores	25
4.e	Relação entre geração e recombinação	26
4.f	O equilíbrio tende a ser mantido	27
4.g	Geração de portadores	28
4.h	Mecanismos de recombinação	29
4.i	Armadilha profunda ou radiativos	31
4.j	Modelo SRH	32
4.k	Shockley-Read-Hall	33
4.l	Recombinação Auger	34
4.m	Equação de recombinação Auger	35
4.n	Recombinação de superfície	36
4.o	Recombinação Langevin	37

Sumário (iii)

5	Manufatura	38
5.a	Escolha do Material Fotocondutor	39
5.b	Resposta à luz	40
5.c	Resposta do CdS	41
5.d	Construção	42
5.e	Diagrama do LDR (Light-Dependent Resistor)	43
5.f	Esquemático do LDR	44
6	Normas	45
6.a	IEC 60747-5-5	46
6.b	JEDEC JESD235	47
7	Aplicações	48
7.a	Sensor de luz	49
7.b	Oscilador Astável 555	50
8	Bibliografia	51
8.a	Fontes	52

1 Introdução e Motivação

Introdução

A fotocondutividade é um fenômeno no qual a condutividade elétrica de um material aumenta quando ele é exposto à luz. Isso ocorre porque os fótons incidentes fornecem energia suficiente para excitar elétrons da banda de valência para a banda de condução, gerando pares elétron-lacuna e reduzindo a resistência elétrica do material. Esse efeito é amplamente utilizado em dispositivos como fotodetectores, células solares e sensores ópticos. A fotocondutividade depende de fatores como o tipo de material, a intensidade e o comprimento de onda da luz incidente.

Fonte: Rethwisch, Callister Junior e. «Ciência e engenharia de materiais : uma introdução», 2008.

Motivação

- Desenvolvimento de sensores e detectores ópticos – A fotocondutividade é a base para a fabricação de fotodetectores usados em câmeras, scanners, sistemas de segurança e telecomunicações.
- Avanços em células solares – O entendimento desse fenômeno contribui para melhorar a eficiência dos painéis solares, otimizando a conversão de luz em eletricidade.
- Pesquisa em novos materiais – O estudo da fotocondutividade ajuda a desenvolver materiais semicondutores inovadores, como perovskitas e nanomateriais, que podem revolucionar a eletrônica e a fônica.
- Aplicações na indústria e medicina – Equipamentos como sensores biomédicos, monitores de radiação e dispositivos de visão noturna utilizam o princípio da fotocondutividade para funcionar de maneira eficiente.

2 Intuição Física

Sem Luz

A intuição física sobre a fotocondutividade pode ser compreendida a partir da interação entre luz e os elétrons de um material, principalmente em semicondutores. Aqui está um jeito simples de visualizar esse fenômeno:

O material é menos condutor.

Em muitos materiais, como semicondutores, os elétrons estão inicialmente presos em estados de baixa energia na banda de valência. Como poucos elétrons estão disponíveis para transportar corrente, o material tem alta resistência elétrica.

Com luz

Aumento da condutividade

Quando o material é iluminado, os fótons da luz fornecem energia suficiente para excitar os elétrons, promovendo-os da banda de valência para a banda de condução.

Isso cria pares elétron-lacuna, onde os elétrons livres podem se mover e contribuir para o fluxo de corrente elétrica.

A presença desses portadores adicionais reduz a resistência elétrica do material, tornando-o mais condutor.

Depende da energia dos fótons

Se a luz incidente tiver fótons com energia menor que a largura da banda proibida do material, nada acontece, pois não há energia suficiente para excitar os elétrons. Se a energia for suficiente, mais elétrons são excitados, aumentando a condutividade do material.

Interrupção da luz

Volta ao estado original.

Quando a luz é desligada, os elétrons e lacunas tendem a recombinar, reduzindo novamente a condutividade do material.

O tempo que isso leva depende das características do material.

3 Experimento de Willoughby Smith

Descoberta da fotosensitividade no Selênio.



Image Source: www.circuitsToday.com

Willoughby Smith

In 1873 English electrical engineer Willoughby Smith[®] discovered that the electrical resistance of selenium varies dramatically with the amount of light falling on it. The photoconductivity of selenium eventually provided a method for converting images into electrical signals—the basis for photoelectric cells and a theoretical basis for television.

Fonte: historyofinformation. «Willoughby Smith Discovers the Photoconductivity of Selenium», 1873.
<https://www.historyofinformation.com/detail.php?entryid=1349>.

Hipótese de Willoughby Smith

A hipótese do experimento de Willoughby Smith não era originalmente sobre a fotocondutividade. Ele estava investigando a possibilidade de usar o selênio como um material com resistência elétrica estável para melhorar os sistemas de telégrafo submarino.

No entanto, ao perceber que a resistência do selênio variava inesperadamente, ele formulou uma nova hipótese.

Fonte: historyofinformation. «Willoughby Smith Discovers the Photoconductivity of Selenium», 1873.
<https://www.historyofinformation.com/detail.php?entryid=1349>.

Hipótese de Willoughby Smith

A condutividade elétrica do selênio pode ser influenciada por fatores externos, como a exposição à luz.

Para testar essa ideia, ele realizou experimentos controlados, nos quais o selênio foi exposto e depois protegido da luz, verificando a mudança na resistência elétrica. Seus testes confirmaram que a luz reduzia a resistência do material, levando à descoberta do fenômeno da fotocondutividade.

Fonte: historyofinformation. «Willoughby Smith Discovers the Photoconductivity of Selenium», 1873.
<https://www.historyofinformation.com/detail.php?entryid=1349>.

Equipamentos Utilizados na Época

- Amostras de selênio em barras ou discos metálicos.
- Bateria química (pilhas de Daniell ou Grove) para fornecer corrente elétrica.
- Eletrodos metálicos para conectar as amostras de selênio ao circuito.
- Galvanômetro de bobina móvel para medir a corrente elétrica que passava pelo material.
- Fontes de luz natural e artificial, incluindo a luz solar e possivelmente lâmpadas incandescentes primitivas ou velas.

Fonte: historyofinformation. «Willoughby Smith Discovers the Photoconductivity of Selenium», 1873.
<https://www.historyofinformation.com/detail.php?entryid=1349>.

Preparação do Circuito

Smith montou um circuito simples, onde uma barra de selênio era conectada entre dois eletrodos metálicos. Uma bateria química aplicava uma tensão fixa ao circuito, e a corrente era medida pelo galvanômetro.

Fonte: historyofinformation. «Willoughby Smith Discovers the Photoconductivity of Selenium», 1873.
<https://www.historyofinformation.com/detail.php?entryid=1349>.

Medição da Condutividade Sem Luz

No início, ele mediu a resistência elétrica do selênio em um ambiente escuro ou sombreado.

Os valores indicavam uma resistência muito alta, sugerindo que o material conduzia pouca eletricidade.

Fonte: historyofinformation. «Willoughby Smith Discovers the Photoconductivity of Selenium», 1873.
<https://www.historyofinformation.com/detail.php?entryid=1349>.

Exposição à Luz e Medição

Quando o selênio foi exposto à luz do sol, a corrente elétrica aumentou significativamente, indicando que a resistência elétrica havia diminuído.

Para confirmar o efeito, ele cobriu novamente a amostra, e a resistência voltou a aumentar.

O efeito foi repetido várias vezes, e os resultados mostraram que o fenômeno era reversível e reprodutível.

Fonte: historyofinformation. «Willoughby Smith Discovers the Photoconductivity of Selenium», 1873.
<https://www.historyofinformation.com/detail.php?entryid=1349>.

Impacto da Descoberta

Essa foi a primeira evidência experimental de que a luz poderia influenciar a condutividade elétrica de um material, abrindo caminho para o desenvolvimento de tecnologias baseadas na fotocondutividade, como fotodetectores, células solares e sensores ópticos.

A descoberta de Smith também motivou estudos sobre os semicondutores, levando a avanços fundamentais na eletrônica e na fotônica (optoeletrônica?).

Fonte: historyofinformation. «Willoughby Smith Discovers the Photoconductivity of Selenium», 1873.
<https://www.historyofinformation.com/detail.php?entryid=1349>.

4 Formalismo Matemático

Considerações Iniciais

Semicondutores possuem uma estrutura de bandas eletrônicas definida pelas propriedades cristalinas. A distribuição de energia dos elétrons é regida pelo nível de Fermi e a temperatura. A zero absoluto, todos os elétrons estão abaixo do nível de Fermi; em temperaturas maiores, seguem a distribuição de Fermi-Dirac.

Fonte: Wikipedia. «Carrier generation and recombination», 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Carrier_generation_and_recombination.

Distribuição de Fermi-Dirac

$$\bar{n}_i = \frac{1}{e^{(\varepsilon_i - \mu)/k_B T} + 1},$$

Figura 2: Para um sistema de férmions idênticos em equilíbrio termodinâmico, o número médio de férmions em um estado de partícula única i é dado pela distribuição de Fermi-Dirac (F-D). Onde k_B é a constante de Boltzmann, T é a temperatura absoluta, ε_i é a energia do estado de partícula única i e μ é o potencial químico total.

Fonte: Wikipedia. «Carrier generation and recombination», 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Carrier_generation_and_recombination.

Semicondutores Intrínsecos

Em semicondutores não dopados, o nível de Fermi fica na lacuna entre a banda de valência (quase cheia) e a banda de condução (quase vazia). Elétrons na banda de valência não são móveis, impedindo a condução elétrica.

Fonte: Wikipedia. «Carrier generation and recombination», 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Carrier_generation_and_recombination.

Geração de portadores

Se um elétron ganha energia suficiente, ele salta para a banda de condução, deixando uma lacuna que age como uma partícula carregada. A geração de portadores ocorre quando elétrons sobem de banda, e a recombinação acontece quando retornam, preenchendo lacunas.

Fonte: Wikipedia. «Carrier generation and recombination», 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Carrier_generation_and_recombination.

Relação entre geração e recombinação

Geração e recombinação ocorrem constantemente em semicondutores, tanto opticamente quanto termicamente. Em equilíbrio térmico, ambas se equilibram, mantendo a densidade de portadores constante. A ocupação dos estados de energia segue a estatística de Fermi-Dirac.

Fonte: Wikipedia. «Carrier generation and recombination», 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Carrier_generation_and_recombination.

O equilíbrio tende a ser mantido

O produto das densidades de elétrons e lacunas (n e p) é uma constante em equilíbrio ($n_o p_o = n_i^2$), mantida pela recombinação e geração em taxas iguais. Quando há um excesso de portadores ($np > n_i^2$), a taxa de recombinação supera a de geração, retornando o sistema ao equilíbrio. Da mesma forma, quando há um déficit de portadores ($np < n_i^2$), a geração excede a recombinação, restaurando o equilíbrio.

Fonte: Wikipedia. «Carrier generation and recombination», 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Carrier_generation_and_recombination.

Geração de portadores

Quando a luz interage com um material, ela pode ser absorvida (gerando um par de portadores livres ou um éxiton) ou pode estimular um evento de recombinação. O fóton gerado tem propriedades semelhantes ao que causou o evento. A absorção é o processo ativo em fotodiodos, células solares e outros fotodetectores semicondutores, enquanto a emissão estimulada é o princípio de funcionamento dos diodos laser.

Além da excitação por luz, portadores em semicondutores também podem ser gerados por um campo elétrico externo, como em LEDs e transistores.

Quando a luz com energia suficiente atinge um semicondutor, ela pode excitar elétrons através da banda proibida, gerando portadores adicionais e reduzindo temporariamente a resistência elétrica do material. Esse aumento da condutividade na presença de luz é chamado fotocondutividade.

Mecanismos de recombinação

A recombinação de portadores pode ocorrer através de múltiplos canais de relaxação. Os principais são a recombinação de banda a banda, a recombinação assistida por armadilhas Shockley–Read–Hall (SRH), a recombinação Auger e a recombinação de superfície.

Esses canais de decaimento podem ser divididos em radiativos e não radiativos. Os não radiativos ocorrem quando a energia excessiva é convertida em calor pela emissão de fônons após o tempo de vida médio $\tau_{\{nr\}}$.

Nos radiativos, pelo menos parte da energia é liberada na forma de emissão de luz ou luminescência após um tempo de vida radiativo $\tau_{\{nr\}}$.

Fonte: Wikipedia. «Carrier generation and recombination», 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Carrier_generation_and_recombination.

Mecanismos de recombinação (ii)

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}}$$

From which we can also define the internal **quantum efficiency** or quantum yield, η as:

$$\eta = \frac{1/\tau_r}{1/\tau_r + 1/\tau_{nr}} = \frac{\text{radiative recombination}}{\text{total recombination}} \leq 1.$$

Figura 3: O tempo de vida dos portadores τ é obtido a partir da taxa de ambos os tipos de eventos.

Fonte: Wikipedia. «Carrier generation and recombination», 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Carrier_generation_and_recombination.

Armadilha profunda ou radiativos

A distinção entre armadilhas rasas e profundas é baseada na proximidade das armadilhas de elétrons à banda de condução e das lacunas à banda de valência. Armadilhas rasas têm uma diferença menor que a energia térmica $k_B T$, enquanto armadilhas profundas têm uma diferença maior. Armadilhas rasas são mais fáceis de esvaziar e, por isso, costumam ser menos prejudiciais ao desempenho de dispositivos optoeletrônicos.

Modelo SRH

No modelo SRH, quatro coisas podem acontecer envolvendo níveis de armadilha:

1. Um elétron na banda de condução pode ser aprisionado em um estado intrabanda.
2. Um elétron pode ser emitido na banda de condução a partir de um nível de armadilha.
3. Uma lacuna na banda de valência pode ser capturada por uma armadilha. Isso é análogo a uma armadilha preenchida liberando um elétron na banda de valência.
4. Uma lacuna capturada pode ser liberada na banda de valência, análoga à captura de um elétron da banda de valência.

Fonte: Wikipedia. «Carrier generation and recombination», 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Carrier_generation_and_recombination.

Shockley-Read-Hall

$$R = \frac{np}{\tau_n(p + p_t) + \tau_p(n + n_t)}$$

Where the average lifetime for electrons and holes are defined as:^[12]

$$\tau_n = \frac{1}{B_n N_t}, \quad \tau_p = \frac{1}{B_p N_t}.$$

Figura 4: Expressão de Shockley-Read-Hall para a recombinação assistida por armadilhas.

Fonte: Wikipedia. «Carrier generation and recombination», 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Carrier_generation_and_recombination.

Recombinação Auger

Na recombinação Auger, a energia é transferida para um terceiro portador, excitando-o a um nível de energia mais alto sem mudar de banda. Após a interação, esse portador normalmente perde energia em vibrações térmicas. Esse processo, que envolve três partículas, é significativo apenas em condições de não equilíbrio, quando a densidade de portadores é alta. O efeito Auger não é facilmente produzido, pois a terceira partícula deve iniciar o processo em um estado instável de alta energia.

Fonte: Wikipedia. «Carrier generation and recombination», 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Carrier_generation_and_recombination.

Equação de recombinação Auger

The Auger lifetime τ_A is given by^[14]

$$\tau_A = \frac{\Delta n}{R_A} = \frac{1}{n^2 C_n + 2n_i^2 (C_n + C_p) + p^2 C_p}.$$

Figura 5: O mecanismo que causa a queda da eficiência dos LEDs foi identificado em 2007 como recombinação Auger.

Fonte: Wikipedia. «Carrier generation and recombination», 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Carrier_generation_and_recombination.

Recombinação de superfície

A recombinação assistida por armadilhas na superfície de um semicondutor é chamada de recombinação de superfície, ocorrendo devido a ligações não saturadas. É caracterizada pela velocidade de recombinação superficial, que depende da densidade de defeitos. Em células solares, pode ser o principal mecanismo de recombinação. Para minimizá-la, utilizam-se camadas de material transparente com larga banda proibida e técnicas de passivação.

Fonte: Wikipedia. «Carrier generation and recombination», 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Carrier_generation_and_recombination.

Recombinação Langevin

A recombinação de superfície em semicondutores ocorre devido a ligações não saturadas e é caracterizada pela velocidade de recombinação superficial. Em células solares, pode ser o principal mecanismo de recombinação. Para minimizá-la, utilizam-se camadas transparentes com larga banda proibida e técnicas de passivação.

Fonte: Wikipedia. «Carrier generation and recombination», 2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Carrier_generation_and_recombination.

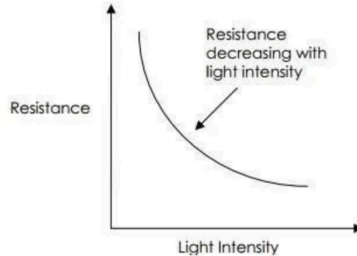
5 Manufatura

Escolha do Material Fotocondutor

Os materiais semicondutores usados em LDRs são geralmente sulfeto de cádmio (CdS), sulfeto de chumbo (PbS) ou seleneto de cádmio (CdSe). O CdS é o mais popular devido à sua boa resposta à luz visível.

Fonte: Stroski, Pedro Ney. «LDR», 2017. <https://www.electricalibrary.com/2017/08/04/ldr/>.

Resposta à luz



A equação da curva característica do LDR.

$$R_f = A \cdot E^{-\alpha}$$

Onde E é a energia luminosa em Lux, R_f é a resistência; A e α são constantes que dependem do material.

Figura 6: Resposta do CdS à luz.

Fonte: Stroski, Pedro Ney. «LDR», 2017. <https://www.electricalibrary.com/2017/08/04/ldr/>.

Resposta do CdS

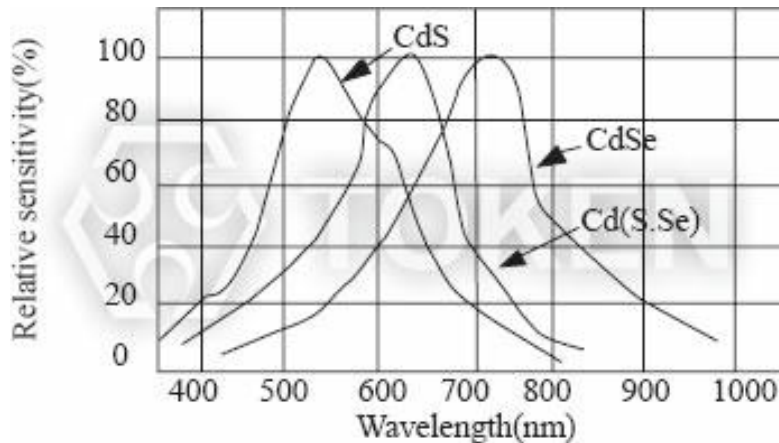


Figura 7: Resposta relativa do sulfeto de cádmio (CdS), CdSe e CD(S,Se) à luz.

Fonte: direct-token. «Terminology (PGM)», sem data. <http://www.direct-token.com/en/resistors/resistors-cds.htm>.

Construção

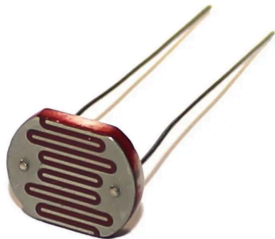


Figura 8: O material sensível a luz do LDR fica em zigue-zague para ter a resistência desejada e é depositado em um substrato de cerâmica.

Fonte: Stroski, Pedro Ney. «LDR», 2017. <https://www.electricalibrary.com/2017/08/04/ldr/>.

Diagrama do LDR (Light-Dependent Resistor)

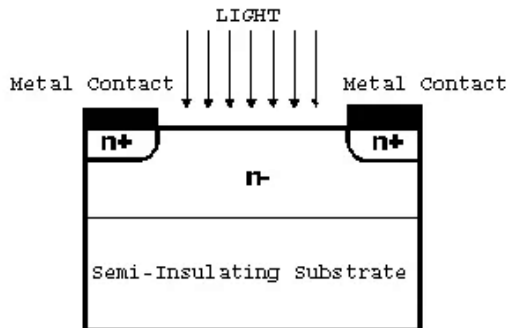


Figura 9: Diagrama do LDR.

Fonte: Stroski, Pedro Ney. «LDR», 2017. <https://www.electricalibrary.com/2017/08/04/ldr/>.

Esquemático do LDR

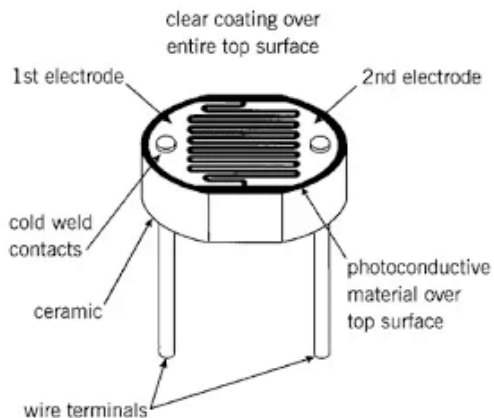


Figura 10: Esquemático do LDR.

Fonte: Stroski, Pedro Ney. «LDR», 2017. <https://www.electricalibrary.com/2017/08/04/ldr/>.

6 Normas

IEC 60747-5-5

Esta norma da Comissão Eletrotécnica Internacional especifica os requisitos para dispositivos semicondutores optoeletrônicos, incluindo fotodiodos e fototransistores, que operam com base na fotocondutividade.

JEDEC JESD235

Emitida pelo JEDEC Solid State Technology Association, esta norma aborda os padrões para sensores de imagem, que utilizam a fotocondutividade em sua operação.

7 Aplicações

Sensor de luz

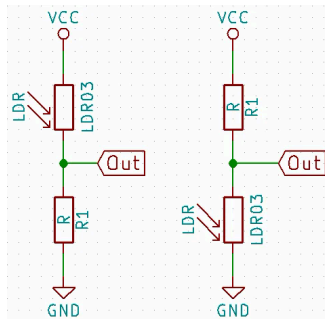


Figura 11: No circuito da esquerda a tensão de saída (no Out) aumenta quando há incidência de luz no LDR e no circuito da direita é o contrário, tensão no “Out” diminui com a incidência de luz. Você pode ligar a saída destes circuitos na entrada analógica de algum microcontrolador. Ou pode ligar a saída na base de um transistor para acionar leds, relés, motores, etc. No circuito abaixo você pode substituir o led e o R2 por um relé ou um motor.

Fonte: Stroski, Pedro Ney. «LDR», 2017. <https://www.electricalibrary.com/2017/08/04/ldr/>.

Oscilador Astável 555

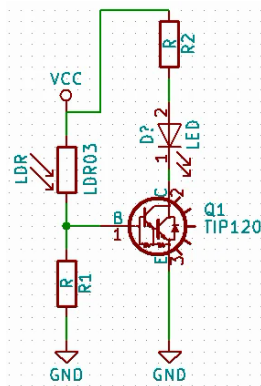


Figura 12: Um circuito oscilador o astável 555 com um resistor trocado por LDR, osciladores sempre tem resistores pois a frequência de oscilação depende deles. Pode-se criar um oscilador controlado por luz.

Fonte: Stroski, Pedro Ney. «LDR», 2017. <https://www.electricalibrary.com/2017/08/04/ldr/>.

8 Bibliografia

Fontes

- [1] C. J. e Rethwisch, «Ciência e engenharia de materiais : uma introdução», 2008.
- [2] historyofinformation, «Willoughby Smith Discovers the Photoconductivity of Selenium», 1873, [Online]. Disponível em: <https://www.historyofinformation.com/detail.php?entryid=1349>
- [3] Wikipedia, «Carrier generation and recombination», 2025, [Online]. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Carrier_generation_and_recombination
- [4] P. N. Stroski, «LDR», 2017, [Online]. Disponível em: <https://www.electricalibrary.com/2017/08/04/ldr/>
- [5] direct-token, «Terminology (PGM)», [Online]. Disponível em: <http://www.direct-token.com/en/resistors/resistors-cds.htm>