

Modalidade do trabalho: Ensaio teórico
Evento: XXIV Seminário de Iniciação Científica

OS PRINCÍPIOS QUÍMICOS E FÍSICOS ENVOLVIDOS NO FUNCIONAMENTO DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS¹

Rudinei Moraes Júnior², Mônica Bagnara³.

¹ Pesquisa bibliográfica

² Aluno do curso de Engenharia Química da Unijuí

³ Professora Doutora do curso de Engenharia Química da Unijuí

INTRODUÇÃO

No presente trabalho de pesquisa será realizada uma breve e objetiva discussão a respeito dos princípios da física quântica e da química envolvidos no funcionamento das células fotovoltaicas. Será feita a apresentação das características gerais das células fotovoltaicas, além de um pequeno recorte histórico sobre a descoberta do efeito fotovoltaico e das células fotovoltaicas. Far-se-á uma abordagem em relação ao efeito fotoelétrico, bem como uma discussão acerca do processo de dopagem em células de silício cristalino.

A motivação prática desse trabalho foi a investigação de como ocorre o processo de transformação da energia proveniente do Sol em eletricidade. Bem como, o interesse pelo fascinante estudo da química e das teorias da mecânica quântica.

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma reflexão a respeito dos fundamentos da química e da física quântica, presentes na transformação da energia proveniente do sol em energia elétrica, por meio das células fotovoltaicas. Tendo em vista também, despertar o interesse da comunidade acadêmica a respeito do desenvolvimento de novas tecnologias que possam vir a baratear o custo das células fotovoltaicas.

Palavras-chaves: Células fotovoltaicas; fóton; efeito fotoelétrico; semicondutores tipo p; semicondutores tipo n; junção pn.

METODOLOGIA

Para obter as informações de interesse deste estudo, foi desenvolvida uma pesquisa bibliográfica acerca dos conteúdos descritos neste trabalho. Utilizou-se para tal a pesquisa em livros e artigos científicos sobre os temas relacionados à área de investigação.

CÉLULA FOTOVOLTAICA

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839 por Edmond Becquerel, que verificou que placas metálicas, de platina ou prata, mergulhadas num eletrólito, produziam uma pequena diferença de potencial quando expostas à luz (BECQUEREL, 1839).

Em 1877, dois inventores norte americanos, W. G. Adams e R. E. Day, utilizaram as propriedades fotocondutoras do selênio para desenvolver o primeiro dispositivo sólido de produção de eletricidade por exposição à luz (ADAMS & DAY, 1877). Entretanto, a eficiência destes primeiros

Modalidade do trabalho: Ensaio teórico
Evento: XXIV Seminário de Iniciação Científica

sistemas era tão reduzida que o desenvolvimento de células solares realmente interessantes teve que esperar por uma compreensão mais completa dos materiais semicondutores (BRITO, et al, 2006). Só em 1954, Chapin e colaboradores, do Bell Laboratory, nos Estados Unidos da América, publicaram o primeiro artigo sobre células solares em silício, ao mesmo tempo em que registavam a patente de uma célula com uma eficiência de 4.5% (CHAPIN, FULLER E PEARSON, 1954).

Características gerais das células fotovoltaicas

A célula solar fotovoltaica é o elemento essencial da conversão da radiação solar em energia elétrica. Cada célula individual, com cerca de 100 mm², gera aos seus terminais uma tensão entre 0.5 e 1 V, com uma corrente típica em curto circuito de algumas dezenas de miliampéres. Esta intensidade da corrente é razoável, mas a tensão é demasiado pequena para a generalidade das aplicações pelo que normalmente as células são montadas em série em painéis solares, com 28 a 36 células, gerando tensões DC da ordem dos 12 V em condições padrão de iluminação. Estes módulos fotovoltaicos podem ser utilizados individualmente ou montados em série e/ou em paralelo, de modo a obterem-se maiores tensões e/ou correntes, conforme as necessidades da aplicação em concreto (BRITO, et al., 2006).

Dentre os materiais usados na fabricação de células fotovoltaicas, o material mais utilizado é o silício cristalino. As razões para esta escolha estão associadas às características únicas deste material, nomeadamente a sua abundância no planeta (cerca de 30%, no conjunto dos elementos que constituem a crosta terrestre), a sua não-toxicidade, o fato de ser a matéria-prima da indústria eletrônica (e portanto ter sido alvo de uma investigação extraordinariamente detalhada nas últimas décadas) e uma série de vantagens técnicas (em particular hiato apropriado à radiação solar, baixo coeficiente de segregação de metais, facilmente dopável, óxido passivante, etc) (BRITO, et al., 2006).

EFEITO FOTOELÉTRICO

O efeito fotoelétrico consiste na emissão de elétrons que ocorre quando a luz com comprimento de onda adequado incide sobre uma superfície. Os elétrons absorvem energia da radiação incidente e, portanto, podem superar a atração das cargas positivas e ser libertados da superfície. Essa atração produz uma barreira de energia potencial que geralmente mantém os elétrons confinados no interior do material (YOUNG, 2009).

O efeito fotoelétrico foi observado inicialmente por Heinrich Hertz em 1887, que verificou que uma centelha passava de uma esfera metálica para outra quando suas superfícies carregadas eram iluminadas pela luz de outra centelha. A luz que incidia sobre as superfícies facilitava a liberação das partículas, os elétrons (YOUNG, 2009).

Teoria proposta por Einstein

Num trabalho publicado em 1905, intitulado “Um ponto de vista heurístico sobre a produção e transformação da luz”, Einstein propôs uma teoria do efeito fotoelétrico baseada numa extensão muito mais audaciosa das ideias de Planck sobre quantização: a de que radiação de frequência f consiste de quanta de energia (NUSSENZVEIG, 1998).

Para a explicação do efeito fotoelétrico, Einstein desenvolveu uma hipótese apresentada cinco anos antes por Max Planck, a respeito da emissão e absorção de energia quantizada. Ele postulou que um

Modalidade do trabalho: Ensaio teórico
Evento: XXIV Seminário de Iniciação Científica

feixe de luz era constituído por pequenos pacotes de energia, chamados de quanta, ou ainda, posteriormente denominados de fóton (YOUNG, 2009). Ou seja, segundo Einstein a radiação eletromagnética seria quantizada e a expressão para determinação da sua energia é apresentada na Equação (1) (HALLIDAY, 2012).

$$E = hf$$

Onde, E é a energia de um fóton, h é a constante de Planck, $h = 6.63 \times 10^{-34}$ (J s), e f é a frequência da radiação.

Na sua teoria a respeito do efeito fotoelétrico Einstein afirmou que “A ideia mais simples é que um quantum de luz transfere toda sua energia a um único elétron: vamos supor que é isto que acontece” (NUSSENZVEIG, 1998). Em outras palavras, quando um fóton de frequência f é absorvido por um elétron, a energia hf do fóton é transferida para o elétron, em um evento de absorção que envolve a aniquilação de um fóton (HALLIDAY, 2012). Essa transferência de energia é um processo do tipo tudo ou nada, ou seja, ou o elétron ganha a energia total do fóton, ou não absorve nenhuma energia; isso contraria o princípio da transferência contínua de energia da física clássica (YOUNG, 2009). Através de seus experimentos, Einstein verificou três importantes características a respeito do efeito fotoelétrico:

1) A energia dos elétrons emitidos pela superfície não depende da intensidade da luz:

Ao contrário do que previa a física clássica, de que se fosse aumentada a intensidade da luz, seria aumentada também a energia com que os elétrons seriam projetados, Einstein verificou que para uma dada frequência, a energia máxima dos elétrons emitidos pelo alvo é sempre a mesma, qualquer que seja a intensidade da luz incidente. Além disso, a energia que pode ser transferida da luz incidente para um elétron do alvo é a energia de um único fóton (HALLIDAY, 2012).

Aumentando a intensidade da luz, aumentamos o número de fótons que incidem no alvo, mas a energia de cada fóton permanece a mesma, já que a frequência não variou. Assim a energia máxima transferida para os elétrons também permanece a mesma (YOUNG, 2009).

2) Existe uma frequência mínima necessária para projetar elétrons:

O efeito fotoelétrico só é observado a partir de uma frequência mínima ou frequência de corte que pode ser relacionado ainda com um comprimento de onda de corte, que depende de material para material. Quando a frequência da luz é menor que a frequência de corte, não são ejetados elétrons, por mais intensa que seja a luz. Quanto maior a frequência da luz emitida, maior a energia cinética $K_{\text{máx}}$ dos elétrons liberados (HALLIDAY, 2012).

Modalidade do trabalho: Ensaio teórico
Evento: XXIV Seminário de Iniciação Científica

3) Equação do efeito fotoelétrico:

Os elétrons são mantidos na superfície do alvo por forças elétricas. Para escapar do alvo, um elétron necessita de uma energia mínima Q que depende do material de que é feito o alvo e recebe o nome de função trabalho Q (HALLIDAY, 2012).

Quando a energia proveniente de um fóton hf é maior que Q , o elétron pode escapar da superfície do alvo. Quanto maior for a função trabalho Q , maior deverá ser a frequência mínima necessária para a emissão de fotoelétrons (YOUNG, 2009).

Por fim, Einstein resumiu os resultados dos experimentos do efeito fotoelétrico na seguinte equação:

$$hf = K_{m\acute{a}x} + \Phi$$

Observação: (Φ) é representado no texto pela letra Q .

Onde, $K_{m\acute{a}x}$ é a energia cinética máxima dos elétrons ejetados.

Essa equação, nada mais é que a lei da conservação da energia aplicada a emissão fotoelétrica de um elétron por um alvo cuja função trabalho é Q . Uma energia igual a energia do fóton hf , é transferida a um elétron do alvo. Para que o elétron escape do mesmo, ele deve possuir uma energia pelo menos igual a Q . Qualquer energia adicional $hf-Q$ recebida do fóton aparece na forma de energia cinética K do elétron emitido. Nas circunstâncias mais favoráveis, o elétron pode escapar do alvo sem perder energia cinética no processo, nesse caso, é ejetado do alvo com maior energia cinética possível, $K_{m\acute{a}x}$ (HALLIDAY, 2012).

Dopagem

Dopagem é definida como um processo de inserção voluntária de impurezas na estrutura do sólido, em posições específicas do retículo cristalino, substituindo as unidades estruturais originais. Trata-se, portanto, de substituição de unidades estruturais por unidades de impureza. Apesar da definição, a dopagem também pode ser decorrente de um processo natural (BENVENUTTI, 2011).

A dopagem artificial é um procedimento muito utilizado em materiais isolantes e semicondutores intrínsecos. A inserção do defeito dopagem, nestes casos, resulta em uma diminuição da energia da banda de gap destes sólidos, sendo que este efeito será tanto maior quanto maior for a carga aplicada ao sólido. Além disso, a dopagem pode ser usada para converter materiais isolantes ou semicondutores intrínsecos em materiais que apresentam uma condutividade relativamente maior. Estes materiais dopados são chamados de semicondutores extrínsecos (BENVENUTTI, 2011).

O processo de dopagem gera dois tipos de semicondutores, quais sejam, semicondutores do tipo n e semicondutores do tipo p (HALLIDAY, 2012). Neste contexto, será utilizado como exemplo o sólido de silício, uma vez que, é o mais tradicional.

Modalidade do trabalho: Ensaio teórico
Evento: XXIV Seminário de Iniciação Científica

Semicondutores do tipo n

Semicondutores do tipo n (negativo) são obtidos quando a dopagem é feita com dopante que apresenta mais elétrons na valência que a unidade estrutural original. Neste caso, o excedente eletrônico que vem do dopante cria um nível doador de elétrons que diminui o gap. Essa dopagem é obtida quando se adiciona fósforo ou arsênio a uma matriz de silício (BENVENUTTI, 2011).

Um átomo de fósforo tem cinco elétrons na sua banda de valência, pelo que cria quatro ligações covalentes com os átomos de Silício e deixa um elétron livre, que viaja através do material. A razão entre átomos de fósforo e de silício é próxima de 1 para 1.000 (BENVENUTTI, 2011).

Os elétrons que participam das ligações entre os átomos de silício pertencem à banda de valência do material. Quando um elétron é arrancado de uma das ligações covalentes e fica livre para vagar pelo material, dizemos que passou da banda de valência para a banda de condução. A energia mínima necessária para que isso aconteça é a distância entre a banda de valência e a extremidade inferior da banda de condução (HALLIDAY, 2012).

Semicondutores do tipo p

Semicondutores do tipo p (positivos) são obtidos quando a dopagem é feita usando-se um dopante que contenha menos elétrons de valência que as unidades estruturais da matriz original. Neste caso, a ausência de elétrons gera também uma diminuição do gap. A inserção de Alumínio ou Boro em uma matriz de silício são exemplos de dopagem do tipo p (BENVENUTTI, 2011).

A partir da introdução de um átomo de alumínio, por exemplo, no lugar de um átomo de silício numa rede cristalina, sabe-se que o átomo de alumínio pode formar ligações covalentes com apenas três átomos de silício, portanto existe uma lacuna (um buraco) em uma das ligações covalentes alumínio-silício. É necessária apenas uma pequena energia para que um elétron seja deslocado de uma ligação silício-silício vizinha para completar essa lacuna, deixando um buraco na ligação covalente original. Esse buraco, por sua vez, pode ser preenchido por um elétron de outra ligação covalente, e assim por diante. Isso significa que o buraco criado pela presença do átomo de alumínio pode se mover na rede cristalina do silício (HALLIDAY, 2012).

Junção pn

Ao se colocar em contato semicondutores do tipo n com semicondutores do tipo p obtém-se uma junção chamada de junção p-n. Quando esses materiais são colocados em contato, os elétrons começam a migrar espontaneamente através da interface no sentido do semicondutor n para o p. Na interface do lado do semicondutor n, tem-se um acúmulo de cargas positivas, devido a saída de elétrons, ao passo que no lado do semicondutor p, a entrada de elétrons provoca um acúmulo de cargas negativas. Esse acúmulo de cargas na junção p-n opõe-se ao sentido da migração espontânea de elétrons, levando a interrupção do processo (TOMA, 2004).

Nesse sentido, a difusão de elétrons do lado n para o p da junção, e a difusão de buracos do lado p para o n, resulta na formação de uma carga espacial nos dois lados do plano na junção, uma positiva e outra negativa. Estas duas regiões formam uma zona de depleção, assim chamada porque quase não contém cargas móveis (HALLIDAY, 2012).

Modalidade do trabalho: Ensaio teórico
Evento: XXIV Seminário de Iniciação Científica

A formação da carga espacial dá origem a uma diferença de potencial de contato entre as extremidades da zona de depleção. Essa diferença de potencial impede que os elétrons e buracos continuem a atravessar o plano da junção (HALLIDAY, 2012).

Quando uma junção for iluminada por uma radiação (luz) de energia $h\nu$, elétrons da banda de valência podem ser excitados para a banda de condução deixando um buraco (portador de carga positiva) na banda de valência. Este sistema é conhecido como par elétron-buraco (SILVA, et al., 2004). É, então, a partir desses pares de elétrons-buracos formados, é que se pode aproveitar o fluxo de elétrons foto-excitados que migram do lado n para o p através de um condutor que liga externamente os semicondutores do tipo p e n, para gerar energia elétrica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho de pesquisa abordam-se os princípios físicos e químicos envolvidos no funcionamento das células fotovoltaicas. Faz-se também uma descrição clara e objetiva sobre o efeito fotoelétrico e o processo de dopagem em semicondutores de silício. Além disso, constata-se que a junção pn é uma boa alternativa para geração de energia elétrica, bastando somente a incidência de uma fonte luminosa, como o Sol, sobre uma célula de material semicondutor.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, W.G. e DAY, R.E. The action of light on selenium. Proceedings of the Royal Society, A25, v. 113, 1877.
- BECQUEREL, E. Memoires sur les effets electriques produits sous l'influence des rayons. Comptes Rendues, v. 9, p. 561, 1839.
- BENVENUTTI, Edilson Valmir. Química inorgânica: átomos, moléculas, líquidos e sólidos. 3 ed. rev. 224p. Porto Alegre: editora da UFRGS, 2011.
- BRITO, Miguel C; SILVA, José A. Energia fotovoltaica: conversão da energia solar em eletricidade. O instalador, 2006.
- CHAPIN, D.M.; FULLER, C.S.; PEARSON, G.L. A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power. Journal of Applied Physics, v. 25, p. 676, 1954.
- HALLIDAY, David. Fundamentos de física: óptica e física moderna. Volume 4. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- NUSSENZVEIG, H. Moysés. Ótica Relatividade Física Quântica. 1ed, Vol.4. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.
- SILVA, Reginaldo, et al. Células solares caseiras. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 26, n.4, 379 – 384, 2004.
- TOMA, Henrique E. O mundo manométrico: a dimensão do novo século. São Paulo: Oficina de textos, 2004.
- YOUNG, Hugh D. Física 4: ótica e física moderna. 12 ed, São Paulo: Addison Wesley, 2009.