

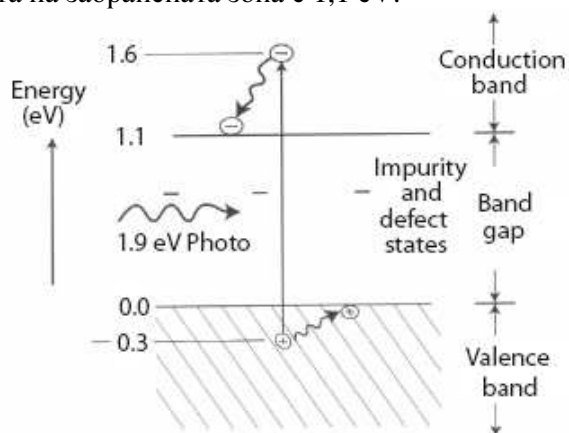
Въведение към слънчевите фотоелементи

Б. Дж. Фелдман¹

Най-вероятно слънчевите фотоелементи ще играят значителна роля в стратегията на страната за справяне с две взаимно свързани предизвикателства: глобалното затопляне и зависимостта от вноса на петрол. Цел на тази статия е да обясни действието на слънчевите фотоелементи на равнището на горните класове в гимназията. Изложението е качествено и до известна степен опростено. Надяваме се, че тази статия поне малко ще мотивира учащите да научат повече за тази технология, чието развитие е от решаващо значение за енергийното и екологично бъдеще на страната.

Един слънчев фотоелемент представлява електронен прибор, който преобразува светлинна енергия в електрична енергия. Процесът включва три етапа: първо, един светлинен квант (фотон) трябва да се погълне от електрон, повишавайки неговата електрична потенциална енергия; второ, този обогатен с енергия електрон трябва да се отдели от неговото начално по-ниско енергетично състояние (наричано *дупка*), преди придадената електрична потенциална енергия да се преобразува в топлина; и трето, този електрон трябва да допринесе за протичане на ток в една външна верига.

Да започнем с първата крачка: електронът поглъща фотон и не успява да изгуби придобитата енергия във вид на топлина. За да се разбере този процес, трябва да се познават енергетичните нива в един полупроводник – материалът, от който се правят слънчевите фотоелементи. На фиг. 1 са показани енергетичните нива, върху които може да се намира електронът в полупроводника: ниско енергетичните нива във валентната зона са изцяло запълнени с електрони и зоната на проводимост, чиито нива са високо и не са заети от електрони. Между горната граница на валентната зона и долната граница на зоната на проводимост се намира т.нар. забранена зона, където има само единични нива, на които може да се намира електрон, които се дължат или на примеси, или на дефекти. За силиция, най-често използваният за слънчеви фотоелементи полупроводник, широчината на забранената зона е 1,1 eV.



Фиг. 1: Енергетичните нива в силициев монокристал. Показан е електрон, който е 0,3 eV под горната граница на валентната зона. След като погълне червен фотон (1,9 eV), той преминава в незаето състояние, намиращо се 0,5 eV над долния край на зоната на проводимост, а във валентната зона остава дупка, намираща се в състояние с енергия 0,3 eV под горния край на валентната зона. След това електронът и дупката преминават съответно върху долния край на зоната на проводимост и горния край на валентната зона. Показани са също така нива в забранената зона, които се дължат на примеси и дефекти.

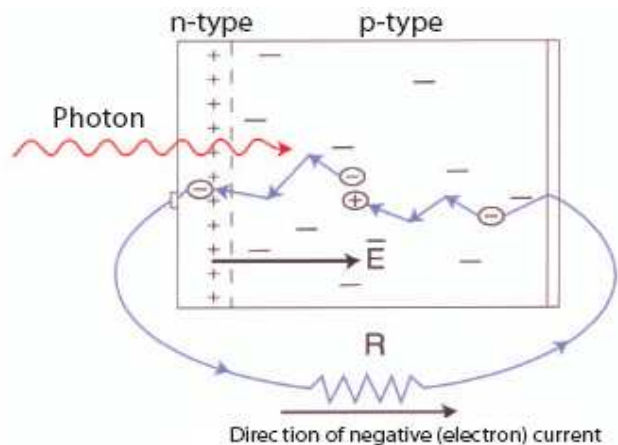
¹ Превод със съкращения от статия, поместена в майската книжка на The Physics Teacher, 2010.

Светлинната енергия се квантува на малки порции енергия – фотони, чиято енергия се определя от произведението на константата на Планк с честотата на светлината; например, един фотон на червената светлина има енергия около 1,9 eV, а фотон на синята светлина – около 2,6 eV. В даден момент един електрон може да погълне само един фотон. Например, валентен електрон в силиция, който се намира 0,3 eV под горната граница на валентната зона, може да погълне червен фотон (1,9 eV) и преминава в състояние, което е 0,5 eV над долната граница на зоната на проводимост, при което остава едно незаето състояние (дупка) във валентната зона (вж. фиг. 1). Забележете, че: 1. при този процес на поглъщане енергията се запазва, т.е. спечелената от електрона енергия е равна на енергията на погълнатия фотон; 2. фотони с енергия, по-малка от 1,1 eV, няма да се поглъщат, тъй като в забранената зона няма енергетични ниво (поглъщането, дължащо се на малкия брой примесни нива и такива от дефекти, се пренебрегва).

Ако фотон предизвика появата на двойка електрон–дупка, електронът бързо попада на долната граница на зоната на проводимост, а дупката – на горната граница на валентната зона, като излъчват звукови вълни с нищожна енергия (от порядъка на 1 meV), която се отдава на решетката като количество топлина. След като се окажат на долната граница на зоната на проводимост и на горната граница на валентната зона съответно, електронът и дупката могат да останат в тези състояния относително дълго време. В отсъствие на електрично поле електронът може да слезе на някое от нивата в забранената зона и евентуално да достигне дупката в горния край на валентната зона.

При наличие на електрично поле обаче, електронът може да бъде отделен от дупката, преди да бъде захванат от примес или дефект. В полупроводника такова вътрешно електрично поле се получава чрез изграждане на p–n–преход с добавяне на специални примеси. В случая на силиция, който е елемент от IV група, във външната обвивка на атома има 4 валентни електрона, които могат да се свържат с четири най-близки съседи, създавайки здрави ковалентни връзки от по два електрона във всяка. Ако един силициев атом се замени с атом на фосфор, който е от V група и има пет електрона във външната си електронна обвивка, четири от валентните електрони на фосфора ще се свържат със съседните силициеви атоми, но петият ще бъде свързан много слабо с фосфорния атом. Поглъщайки малка топлинна енергия, този пети електрон ще прескочи в долната част на зоната на проводимост и ще се движи свободно в кристала. По подобен начин, ако атом на елемент от III група, например бор, замести един силициев атом, всичките три валентни електрона на бора ще се свържат със съседни силициеви атоми, като остава един недостигащ за образуване на ковалентна връзка електрон (дупка). Поглъщайки малко топлинна енергия, дупката се издига до горната граница на валентната зона и се движи свободно в кристала.

Един p–n–преход се формира чрез добавяне в една област на фосфор (област с n–тип проводимост), а в съседната област – на бор (област с p–тип проводимост) (вж. фиг. 2). Свободните електрони от n–областта в близост до прехода дифундират в p–областта и рекомбинират със свободните дупки. По този начин в n–областта до прехода почти не остават свободни електрони, а в p–областта – свободни дупки. Остава една положително заредена n–област с йонизирани фосфорни атоми, и една отрицателно заредена p–област със заредени атоми на бор, като и в двете зони почти отсъстват подвижни заряди. В тази обеднена откъм свободни заряди област се установява електрично поле – полето, необходимо за разделяне на погълнатия енергия електрон от останалата на негово място дупка. Един такъв електрон, намиращ се в p–областта, ще се ускори към n–областта, създавайки разделение на зарядите, което отблъсква електрона с висока енергия от n–областта във външната верига и привлича един ниско енергетичен електрон от другия край на външната верига към p–областта, за да запълни ниско енергетичната дупка.



Фиг. 2: Схема на p–n–прехода, показваща вътрешното поле E , създадено от положителните фосфорни йони (+) и отрицателните йони на бора (-). Показана е също двойка електрон–дупка, родена от поглъщане на фотон в областта на p–n–прехода. Свободният електрон се ускорява от електричното поле и се натрупва в n–областта, а със синьо е показан токът, дължащ се на движението на този свободен електрон през слънчевия фотоелемент и товарното съпротивление R .

Нека сега разгледаме по-подробно какво е необходимо за оптимизиране действието на слънчевите фотоелементи. Първо, от какъв материал трябва да се направи вашият слънчев фотоелемент? Различните полупроводници имат забранени зони с различна широчина. Много фактори влияят върху решението. Първо – коя е идеалната широчина на забранената зона за слънчевия фотоелемент? Забележете, че ако тя е твърде тясна, голяма част от слънчевите фотони ще се погълнат, но и голяма част от погълнатата енергия ще се изгуби при топлинните преходи на освободените електрони към долната граница на зоната на проводимост и на дупките – към горния край на валентната зона. Ако пък забранената зона е твърде широка, малка част от погълнатата енергия ще се губи при тези преходи, но също така и много малко фотони ще бъдат погълнати (само тези с достатъчно голяма енергия – бел. прев.). Оптималната широчина на забранената зона е между тези два гранични случая и възлиза на 1,4 eV, при което най-много 33 % от слънчевата енергия ще се преобразува в електрична енергия. (Ефективността може да се увеличи чрез използване на многослойни слънчеви фотоелементи, състоящи се, например от елемент с широка забранена зона, след който следва фотоелемент с тясна забранена зона.)

Оптимизацията на широчината на забранената зона обаче не е единственият фактор, определящ избора на материала. Решаваща роля за това решение играят икономически съображения и за да се получи по-малка цена, трябва да се жертва част от изискването за ефективност на преобразуването. Тази оптимизация, не по отношение на мощността, а по отношение на мощност за един долар, за повечето приложения дава предимство на силициевите монокристали пред другите материали и многослойните слънчеви фотоелементи.

Второ, ефективността на един слънчев фотоелемент зависи също така от ефективността на натрупването на електрони. Именно: винаги съществува възможност един електрон от зоната на проводимост да рекомбинира с дупка, преди да достигне n–областта. Тази възможност трябва да се минимизира. Тъй като наличието на примесни нива и нива, дължащи се на дефекти увеличава тази възможност, материалът за слънчевите елементи трябва да се произвежда така, че количеството на примеси и дефекти да

бъде минимално и затова цената за производството на такива висококачествени материали и важен фактор при избора на материала.

Трети фактор, който влияе върху ефективността на натрупването на електрони е концентрацията и размера на n - и p -областите. Преди всичко ние се стремим към натрупване на електрони, а не на дупки, тъй като подвижността на електроните е много по-голяма от тази на дупките, а това означава, че е много по-вероятно те да се натрупат преди термализацията. За да се постигне максимално натрупване на електрони, n -тип областта се прави тънка и силно легирана, докато p -тип областта е широка и слабо легирана – вж. фиг. 2. При това положение голямата част от фотоните се поглъщат в p -областта. Това положение се постига посредством следния процес: силициевият кристал се израства с малка концентрация на p -тип примеси, след което чрез нагряване в присъствието на фосфорни атоми в повърхностния слой дифундират n -тип примеси. Последната стъпка в производството включва нанасяне чрез изпарение на слой, който намалява отражателната способност на повърхността и прикрепване към нея на жички, които правят електричен контакт с n -слоя. Масово произвежданите днес слънчеви фотоеlementи със силициеви монокристали достигат коефициент на полезно действие около 15 %.