

Солнечная энергетика: анализ зонной модели проводимости полупроводников с позиции квантовой теории

И.Е. Колесниченко, Е.А. Колесниченко✉, Е.И. Любомищенко, Е.И. Колесниченко

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Шахты, Российская Федерация

✉ kolesnichenko-2718@rambler.ru

Резюме: Статья посвящена проблеме повышения энергоэффективности использования солнечной энергии для получения электрического тока. Идея состоит в том, что повышение энергоэффективности применения этого способа зависит от совершенствования теоретических представлений о физических явлениях и закономерностях в технических устройствах. Цель работы – уточнение причинно-следственных связей и обоснование закономерностей физических явлений в устройствах преобразования солнечной в электрическую энергию с позиции фундаментальных аксиом квантовой теории в молекулярных системах, что позволит повысить энергоэффективность применения солнечной энергетике. Приведён анализ распространённых в научной и учебной литературе представлений об электрическом токе, свободных и лишнем электронах в атомах, о движении зарядов под действием электрического тока. Научная новизна заключается в разработке концепции научных положений в области физики, электротехники и химии. Впервые сформировано новое представление об энергетических явлениях в многослойных конструкциях полупроводниковых устройств для преобразования солнечных излучений в электрический ток. Представлена схема генерирования электрического тока при облучении солнечной энергией этих устройств. Электрический ток в замкнутой цепи – это суммарная поглощённая солнечная энергия валентными электронами полупроводниками устройства, которая ими концентрированно излучается в замкнутой электрической цепи. Практическое значение новых знаний заключается в совершенствовании профессиональных компетенций и повышении энергоэффективности технологических устройств для преобразования солнечной энергии в электрический ток.

Ключевые слова: солнечная теория, зонная теория, электрический ток, квантовая теория, полупроводники, энергия, возобновляемые источники, устройство, электрон, энергетическое строение, фотоны, эксперимент, энергоэффективность

Для цитирования: Колесниченко И.Е., Колесниченко Е.А., Любомищенко Е.И., Колесниченко Е.И. Солнечная энергетика: анализ зонной модели проводимости полупроводников с позиции квантовой теории. *Горная промышленность*. 2022;(3):118–124. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-118-124>

Solar power engineering: analysis of the zone model of semiconductor conductivity from the quantum theory perspective

I.E. Kolesnichenko, E.A. Kolesnichenko✉, E.I. Lyubomishchenko, E.I. Kolesnichenko

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Shakhty, Russian Federation

✉ kolesnichenko-2718@rambler.ru

Abstract: The article focuses on the challenges of improving the energy efficiency when using the solar energy for electrical power generation. The key point is that improvement of the energy efficiency in application of this method depends on enhancement of theoretical knowledge on physical phenomena and regularities in technical devices. The objective of this research is to clarify the cause-and-effect relations and to explain regularities of physical phenomena in devices that convert solar power into electric energy in terms of fundamental axioms of the quantum theory in molecular systems, which would open up the possibilities to enhance the energy efficiency of solar power engineering. The paper analyzes the notions that are common in the scientific and educational literature and are related to electric current, free and superfluous electrons in atoms, and the motion of charged particles under the action of electric current. The scientific novelty consists in conceptualization of scientific statements in the fields of physics, electrical engineering and chemistry. A new concept of the energy phenomena in multilayer structures of semiconductor-based devices for conversion of solar radiation into the electric current has been formed for the first time ever. A schematic diagram of electric power generation upon solar irradiation of these devices is presented. The electric current in a closed circuit is the total solar energy absorbed by the valence electrons of the device's semiconductors, which they emit in a concentrated manner within a closed electric circuit. The practical value of the new knowledge lies in improving the professional competences and enhancing the energy efficiency of technological devices used to convert solar energy into electric current.

Keywords: solar theory, zone theory, electric current, quantum theory, semiconductors, energy, renewable sources, device, electron, energy structure, photons, experiment, energy efficiency

For citation: Kolesnichenko I.E., Kolesnichenko E.A., Lyubomishchenko E.I., Kolesnichenko E.I. Solar power engineering: analysis of the zone model of semiconductor conductivity from the quantum theory perspective. *Russian Mining Industry*. 2022;(3):118–124. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-118-124>

Введение

Актуальность. Современное состояние энергетики в мире характеризуется попытками сократить применение невозобновляемых видов носителей энергии для получения электрической энергии. Появилась гипотеза, что для решения проблемы глобального повышения температуры атмосферного воздуха необходимо уменьшать применение традиционных энергоносителей – нефти, угля и каменного угля¹ [1]. Одним из видов возобновляемой энергии, получающей распространение, является солнечная, которая в виде электромагнитных излучений достигает земной поверхности. Этот вид энергии получил распространение в отдалённых от электрических сетей населённых пунктах. Проблема заключается, во-первых, в дороговизне конструкции устройства для преобразования солнечного излучения в электрический ток, и, во-вторых, в зависимости эффективности от времени года и суток, от погодных условий. Решить проблему можно в результате совершенствования конструкции этого устройства. Однако технические проблемы зависят от теоретического обоснования этой конструкции. Таким образом, главным условием решения проблемы эффективности использования солнечной энергии для получения электричества являются научно обоснованные знания физических процессов в техническом устройстве.

Опыт применения современных устройств показал, что при высокой стоимости их коэффициент полезного действия (КПД) не превышает 20% [2; 3]. Для изготовления солнечных батарей применяют специально изготавливаемые конструкции из полупроводников [4; 5]. При этом теоретическим обоснованием при выборе этих полупроводников служат их свойства, приведенные в физике [4] и химии [5]. Основой этих теоретических идей послужили исследования немецкого физика Томаса Иоганн Зеебека, который в 1821 г. обнаружил, что при нагревании термопары разнородных проводников образуется электрический ток [6]. По мнению Т.И. Зеебека, при нагревании различных проводников в результате температурного градиента образуется тепловой поток, который переносит носители зарядов. А. Вольта считал, что источником тока является контакт металлов, т.е. металлы не просто проводники, а являются источниками электричества. Теоретическая научная база применения тепловой энергии развивалась постепенно, по мере накопления экспериментального опыта. В последние годы получили распространение устройства, преобразующие солнечную тепловую энергию в электрический ток. Для объяснения физического явления и конструкции устройств для получения электрического тока была разработана зонная теория, которая стала основой теории металлов, полупроводников и диэлектриков. Одна-

ко теоретической основой этой теории послужили ранние представления о квантовой теории. Современные научные знания об этой теории существенно отличаются от этих представлений.

Цель работы – уточнение причинно-следственных связей и обоснование закономерностей физических явлений в устройствах преобразования солнечной в электрическую энергию с позиции фундаментальных аксиом квантовой теории в молекулярных системах, что позволит повысить эффективность применения солнечной энергетики.

Проблема повышения эффективности применения способа преобразования солнечной энергии в электрический ток зависит от совершенствования теоретических представлений о физических явлениях и закономерностях в технических устройствах.

Объекты исследования. Объектами приняты устройства и физические явления преобразования первичной солнечной энергии во вторичную, которая в виде электрического тока поступает в замкнутую электрическую цепь. На рис. 1 показана принципиальная схема такой цепи. Основным элементом при таком способе является устройство 2 преобразования солнечной энергии в электрическую.

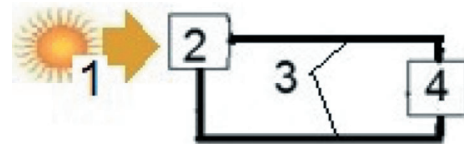


Рис. 1
Принципиальная электрическая цепь с устройством преобразования солнечной энергии в электрическую:
1 – поток солнечной энергии;
2 – устройство преобразования солнечной энергии в электрический ток;
3 – проводник электрического тока; 4 – приёмник электрического тока

Fig. 1
A schematic electrical diagram with a device to convert the solar energy into the electric power:
1 – solar energy flow;
2 – solar energy to electric power conversion device;
3 – electric current conductor;
4 – electric current receiver

Результаты и обсуждения

К основным понятиям, характеризующим генерируемый электрический ток, относятся определения «электрический заряд, электрический ток и параметры его энергии». В Справочнике по физике [4] приведено, что электрический ток создаётся так называемыми свободными электронами, движущимися с относительно малой скоростью. Это определение принято в современной учебной и методической литературе. Элементарной единицей электрического заряда принят

¹ Государственная программа Российской Федерации «Развитие энергетики»: постановление Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 г. № 321.

заряд электрона, равный $e = 1,6021892 \cdot 10^{-19}$ Кл (кулона). При переводе этой энергии в электрические единицы величина заряда электрона равна $e = 1$ эВ (электрон-вольт). Предположение о наличии свободных электронов допускает разрушение структуры атома: «При недостатке электронов тело заряжается положительно, а при избытке электронов тело заряжается отрицательно» [4]. Это предположение противоречит Периодической системе элементов Д.И. Менделеева и является обоснованием алхимии [4; 5]. Однако этот взгляд на наличие и перемещение свободных электронов в веществе и в настоящее время принят в зонной теории, а также в разделах физики и химии [4; 5].

В 1887 г. Г. Герц обнаружил, что «при взаимодействии излучения с веществом излучение передаёт веществу энергию. В результате такого взаимодействия появляется ряд эффектов» [6]. Такой эффект был назван фотоэлектрическим. Последующие исследователи этот эффект объяснили тем, что происходит «явление вырывания из тел электронов под действием света» [6]. В 1888 г. А. Столетов сформулировал 12 тезисов, в которых утверждал, что в веществе образуется различная объёмная плотность отрицательных и положительных зарядов. Так как объёмная плотность потенциальной энергии поля у отрицательного (катода) больше, чем у положительного анода, то переток энергии начинается от катода к аноду. Величина энергии фототокка зависит от интенсивности падающего на катод светового потока и от длины волны поглощённого фотона [6]. Эти научные основы определили разработку современных устройств для преобразования солнечной энергии в электрический ток. Тезис А. Столетова, что «энергия фотона расходуется на разрыв связей электрона со своим окружением» соответствует и представлениям квантовой теории [7].

Теорию фотоэффекта развил также и немецкий учёный А. Эйнштейн, предложив в 1905 г. уравнение $h\nu = A + (m \cdot v^2)/2$, за которое в 1921 г. получил Нобелевскую премию, где h – энергия фотона, A – минимальная работа выхода электрона из атома вещества, $(m \cdot v^2)/2$ – кинетическая энергия электрона при поглощении дополнительной энергии [6]. По его представлениям после выхода из атома электрон продолжает свободно передвигаться. Направленное движение этих электронов и есть электрический ток. Однако исследователи в области теплоёмкости твёрдых тел показали, что модель теории Эйнштейна непригодна для расчётов, так как не согласуется с экспериментом [8]. По мнению авторов статьи, в Справочнике по физике [4] содержание раздела электрическая проводимость отражены устаревшие идеи, что носители зарядов движутся под действием электрического поля: отрицательные заряды движутся от отрицательного полюса к положительному; а положительные заряды движутся от положительного полюса к отрицательному. Полный ток равен сумме токов, обусловленных обоими видами носителей зарядов. Из этого утверждения неясно, что такое электрический ток, носители зарядов которого движутся в разные стороны.

Анализ парадигмы развития научных знаний о физических явлениях превращения солнечной энергии в электрический ток показал, что они представляют собой «чёрный ящик» и остались на уровне начала XX в. «Чёрный ящик» – система, о внутренней организации поведения которой сведений нет, но существует возможность воздействовать на её входы и воспринимать воздействия её выходов. В основном эта тема отражена в публикациях различных

блогеров². Конструкции устройств для преобразования солнечной энергии в электрический ток обосновываются зонной моделью проводимости [4] или зонной теорией твёрдых тел [6; 9; 10]. На практике применяют различные конструкции таких устройств. Считается, если устройство работает, значит принятая теория не иллюзия. В электрическом поле атомов твёрдых тел по версии зонной модели различают зоны: валентную, проводимости и запрещённую. Величина запрещённой зоны является критерием проводимости и отнесения твёрдых тел к проводникам, полупроводникам и непроводникам (диэлектрикам) [4; 6] и сверхпроводникам [5]. По версии зонной модели электрические свойства вещества зависят от ширины условно запрещённой зоны, расположенной между зонами валентной и проводимости [4; 6]. Считаем, что эти свойства зависят от стационарного положения неспаренных валентных электронов в электрическом поле атома [5; 11].

Авторы статьи считают устаревшей саму научную основу зонной модели, что электрический ток создаётся свободными электронами, движущимися с относительно малой скоростью [4; 9; 12; 13]. Электроны могут только перескакивать «запрещённую» зону на свободную орбиталь, обращаясь по орбиталам вокруг ядра атома, расположенным дальше от ядра атома при поглощении фотонов энергии, например, солнечной. Рассмотрим устройство для преобразования солнечной энергии в электрический ток. Современные устройства состоят из фотоэлементов – полупроводников с разной проводимостью [10; 11; 14–16]. С лицевой стороны к солнечному излучению расположен полупроводник, у которого есть «лишние электроны», и обозначаемый как полупроводник n -типа. С тыльной стороны расположен слой полупроводника p -типа, у которого электронов «не хватает».

Суть эффекта появления электричества объясняют разностью потенциалов между двумя слоями полупроводников при солнечном облучении слоя n -типа.

По гипотезе зонной теории «лишние электроны» из n -слоя могут покинуть свои атомы, тогда как p -слой эти электроны захватывает. Солнечные излучения «выбивают» электроны n из атомов n -слоя, которые летят в p -слой занимать пустующие места. Навстречу этим электронам перемещаются свободные «дырки» p . В результате в замкнутой цепи нагрузка образуется электрический ток. Несмотря на явное отсутствие объяснений физических процессов при образовании электрического тока, нужно отметить практический результат применения двойной, а затем и многослойной конструкции устройства.

Квантовая теория преобразования солнечной энергии в электрический ток

Твёрдое тело из энергетически связанных между собой атомов условно представлено в форме периодических кристаллов (рис. 2). Из молекулярно-кинетической теории (МКТ) известно [8], что воображаемая форма периодичности зависит от количества и места расположения в электрическом поле электронов на разрешённых энергетических орбитах атома. На рис. 2 видно, что атомы проводника меди связаны с четырьмя или шестью соседними атомами (рис. 2, а), а атомы полупроводника кремния – с четырьмя (рис. 2, б).

В соответствии с принципом Паули (1925 г.) все атомы имеют электронную структуру. Количество отрицательно

² Электрический ток в металлах. Режим доступа: https://questionsphysics.ru/elektrodinamika/elektricheskiy_tok_v_metallah.html (дата обращения: 05.03.2020).

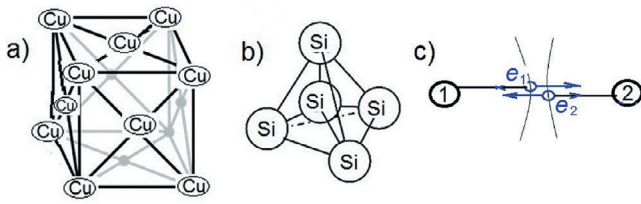


Рис. 2
Энергетическая структура связи атомов меди Cu и кремния Si:
а – атомов меди;
б – атомов кремния;
с – схема связи электронов с соседними ядрами атомов;
1, 2 – номера ядер атомов;
e1, e2 – соответственно валентные электроны атомов 1 и 2

Fig. 2
Energy structure of copper (Cu) and silicon (Si) atoms bonding:
a – copper atoms;
b – silicon atoms;
c – bonding pattern between electrons and neighbouring atomic nuclei;
1, 2 – numbers of the atomic nuclei;
e1, e2 – valence electrons of atoms 1 and 2 respectively

заряженных электронов в атомах соответствует определенному химическому элементу [5]. В соответствии с законами физики вокруг положительно заряженного ядра атома наводится сферическое электрическое поле. Уравнение воображаемой поверхности этого поля отражается в трёхмерных координатах: $\phi = \phi(x, y, z) = \text{const}$ [9]. Все электроны атома обращаются вокруг ядра в сферических эквипотенциальных плоскостях. Энергия связи электрона с ядром зависит от его расположения на разрешённых энергетических уровнях или подуровнях. Валентные электроны обладают волновой формой энергии, электромагнитными свойствами. Поэтому присоединяют из окружающей среды электромагнитную энергию в виде фотонов и излучают её в окружающие атомы.

Рассмотрим схему энергетического соединения двух атомов 1 и 2 (рис. 2, с). Отрицательно заряженный валентный электрон атома 1, обращаясь в электрическом поле ядра этого атома, притягивается энергетически ядром атома 2. Валентный электрон атома 2 оказывается в энергетическом взаимодействии с ядром атома 1. Образуется перекрёстная энергетическая связь электронов с ядрами атомов. При этом валентные электроны независимо один от другого самостоятельно поглощают и излучают фотоны энергии. Такая энергетическая конфигурация не позволяет электрону улетать из атома и превращать, например, ртуть Hg в золото Au. Спаренные электроны находятся на постоянных разрешённых орбиталях. После присоединения фотона энергия связи электрона с ядром уменьшается, и он перескакивает дальше от ядра на свободный энергетический уровень или подуровень.

Квантовая теория энергетических явлений в устройстве преобразования солнечной энергии

Рассмотрим конструкцию устройства, состоящего из слоёв меди и кремния (рис. 3). По концепции авторов статьи и закономерностям квантовой теории в устройстве необходимо знать не общее представление о зонах, а объективные данные об энергетических возможностях химических элементов в слоях [7]. Задача выбора материала для слоёв не в том, чтобы считать лишние электроны, а обеспечить взаимодействие их для повышения энергетической эффективности устройства. Также необходимо учитывать

и температурные параметры материалов, чтобы слои не расплавились или не разрушились при излучениях электронов. Принимаем верхний слой устройства из меди Cu. Медь – одноатомная молекула. Атом меди состоит из положительно заряженного ядра и 29 отрицательно заряженных электронов. Молярная масса меди $M = 63,546$ г/моль. В одном кубическом миллиметре медного проводника находится $0,849 \cdot 10^{20}$ атомов меди. Для оценки возможностей атома меди рассмотрим расположение валентных электронов (рис. 4, а). Присоединять фотоны энергии могут от четырёх до шести валентных электронов (рис. 2, а). Все атомы занимают свои места до поглощения излучения солнечной энергии. Свободных электронов в атоме нет.

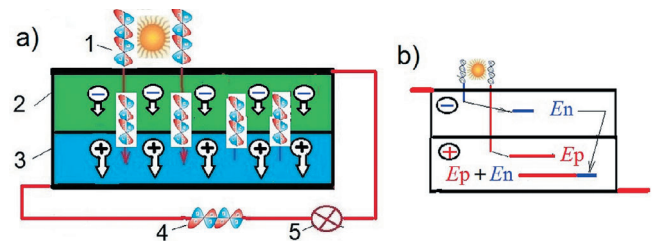


Рис. 3
Принципиальная схема генерирования электрического тока при облучении устройства солнечной энергией:
где 1 – излучения солнечной энергии;
2 – слой полупроводника n-типа;
3 – слой полупроводника p-типа; 4 – электромагнитные излучения в проводнике – электрический ток;
5 – электрическая нагрузка;
En, Ep – соответственно энергия, излучаемая валентными электронами меди Cu и кремния Si

Fig. 3
A schematic diagram of electric current generation when the device is irradiated by the solar energy:
where 1 is the solar energy radiation;
2 is the n-type semiconductor layer;
3 is the p-type semiconductor layer;
4 is electromagnetic radiation in the conductor, i.e. the electric current;
5 – electric load; En, Ep is the energy emitted by the valence electrons of copper (Cu) and silicon (Si) accordingly

Принимаем, что нижний слой состоит из кремния. Молекула кремния одноатомная. Плотность кремния $2,33$ г/см³, молярная масса $M = 28,0855$ г/моль. В одном кубическом миллиметре кремния находится $0,5 \cdot 10^{20}$ атомов. В атоме кремния 14 электронов, из них 4 – валентные (рис. 4, б).

Энергетические явления в слоях полупроводников

Солнце излучает широкий спектр фотонов с различной энергией и длиной волны, которые пронизывают слои меди и кремния. В медном слое валентные электроны с уровней 3d могут перескакивать на уровни 4p и 4d. При этом образуются 6 валентных электронов. На энергетической характеристике (рис. 4, а) можно определить, что минимальная энергия поглощаемого и излучаемого фотона примерно 0,85 эВ. В слое из кремния при поглощении фотона один электрон с уровня 3s может перейти на энергетические уровни 3p, 4s, 3d, 4p. В этом случае образуются 4 валентных электрона. Отличие атома полупроводника кремния от медного состоит в том, что для перескока валентного электрона на ближайший разрешённый уровень ему нужно присоединить фотон с энергией около 1,2 эВ

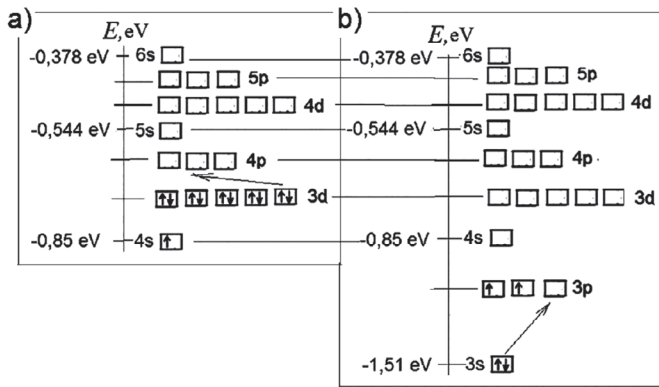


Рис. 4
 Схема (урезанная) электронов на орбитальных энергетических уровнях и подуровнях в атомах меди Cu и кремния Si:
 а – атом меди Cu;
 б – атом кремния Si;
 E – энергия связи электрона с ядром атома, эВ;
 3s ... 7s – энергетические уровни; p, d – энергетические подуровни

Fig. 4
 A schematic diagram (abridged) of electrons at the orbital energy levels and sublevels in copper (Cu) and silicon (Si) atoms:
 а – copper (Cu) atom;
 б – silicon (Si) atom;
 E – energy of bonding between the electron and the atomic nucleus, eV;
 3s ... 7s – energy levels; p, d – energy sublevels

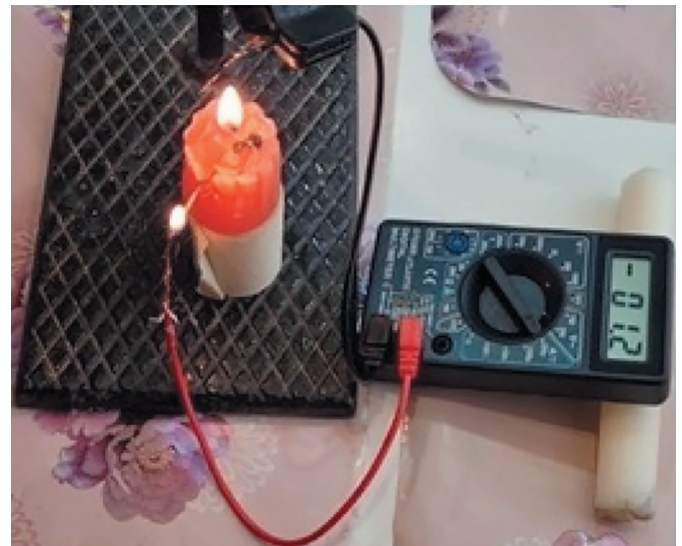


Рис. 5
 Фото компонентов электрической цепи для получения электрического тока при нагревании медного проводника пламенем свечи

Fig. 5
 Photo of the electrical circuit components needed to generate electric current by heating a copper conductor with a candle flame

(рис. 4, б). При поглощении фотона с большей энергией электрон может перескочить через несколько энергетических уровней. На этих уровнях электроны могут присоединять дополнительно фотоны, так как продолжительность пребывания его на уровне возбуждённого состояния порядка $10^{-8} - 10^{-10}$ с.

Направление электромагнитных излучений в замкнутой цепи

Энергетические явления в слоях устройства происходят так. Например, электроны атомов медного слоя n-типа излучают фотоны с энергией 0,85 эВ. Распространение этих фотонов через слой p-типа исключено, так как недостаточно энергии для перескока электрона на свободный энергетический уровень. Излучение фотонов слоя кремния p-типа в сторону слоя меди n-типа невозможно, так как фотоны с такой энергией не могут присоединяться электронами меди. Поэтому в рассматриваемом устройстве, состоящем из двух слоёв, поток фотонов от слоя p-типа излучается в электрическую цепь, через электрическую нагрузку к n-слою (рис. 3, а). При этом электроны нижнего p-слоя поглощают фотоны из n-слоя и излучают в сеть фотоны с суммарной ($E_p + E_n$) энергией (1,2 + 0,85) эВ (рис. 3, б). Для определения таких параметров, как сила и мощность электрического тока, в примере недостаточно данных. Круговое движение излучаемых фотонов отсутствует. После прекращения солнечного облучения устройство не вырабатывает электрический ток.

Описание энергетических явлений в слоях устройства даёт основание сделать вывод, что электрический ток в цепи – это поток фотонов, излучаемый слоем p-типа. Естественно, что существуют излучения фотонов энергии обоими слоями устройства в окружающую атмосферу.

При применении устройства с одним из слоёв n-типа или

p-типа в электрическую цепь будет излучаться электрический ток соответствующей энергии.

Экспериментальное получение электрического тока в медном проводнике

Устройством для получения электрического тока был принят со снятой изоляцией участок проводника, соединяющего тестовые щупы с цифровым мультиметром DT-830B (рис. 5).

Источник теплового излучения – пламя свечи, температура которого 1540 °C в области излучения на проводник. Мультиметром DT-830B было зафиксировано возникновение и показана сила тока в замкнутой электрической цепи. Показания силы тока изменялись в зависимости от температуры нагревания. Известно, что температура плавления меди 1423 °C [5]. Поэтому проводник «перегорел». В результате расчёта определено, что энергия электромагнитного излучения свечи равна 0,776 эВ, а частота излучения $187,7 \cdot 10^{12}$ Гц. Для сравнения, энергия солнечного излучения в видимом диапазоне от 1,77 эВ до 3,1 эВ, а частота излучения в диапазоне от $428 \cdot 10^{12}$ до $750 \cdot 10^{12}$ Гц.

По результатам эксперимента можно сделать выводы:

- пламя свечи представляет собой электромагнитное излучение энергии;
- существует много способов преобразования солнечной и тепловой энергии в электрический ток и повышения энергоэффективности этих способов.

Заключение

Впервые сформулированы закономерности физических явлений образования потоков электромагнитных излучений в устройстве, состоящем из слоёв различных полупроводников. Анализ физических явлений в устройстве из полупроводникового материала показывает, что их электронно-атомная структура поглощает солнечные электромагнитные излучения с определённой энергией

и излучает в замкнутую электрическую цепь концентрированный поток электромагнитных излучений. Электрический ток в замкнутой цепи – это электромагнитные излучения полупроводникового устройства, распространяющиеся в сконцентрированном виде в ограниченном поперечном сечении проводников внешней сети.

Научная новизна заключается в формировании на основе современных фундаментальных аксиом квантовой теории новых научных знаний, ранее не входящих в существующую систему научных представлений в области физики, электротехники и химии. Трёхмерная форма электростатического поля вокруг ядра любого атома, составляющая одну из основных свойств электростатики, определяет энергетические уровни в этом поле и физические явления электронов. В электромагнитном поле валентных электронов нереально наличие и перемещение свободных электронов. Современные замеры энергии взаимодействия между атомами и молекулами доказали, что они имеют электромагнитную природу, и она измеряется такими же параметрами и единицами измерения, как и солнечная энергия. Утверждение, что происходит «явление вырывания из тел электронов под действием света», нереально из-за сферической формы электростатического поля и недостаточной энергии излучений в видимом диапазоне. С точки зрения электронно-атомных

энергетических процессов в атомах с кристаллической периодичностью и физического явления образования потока электромагнитного излучения, понятие «объёмная плотность потенциальной энергии поля у катода...» нельзя отнести к научным определениям физики. Впервые получено новое представление об энергетических явлениях в многослойном полупроводниковом устройстве, основой которого приняты физические аксиомы квантовой теории, альтернативные «зонной модели». С позиций квантовой теории энергия валентных электронов верхнего слоя n-типа устройства служит для увеличения излучаемой энергии нижним слоем p-типа.

Практическое значение анализа зонной модели проводимости полупроводников с позиции квантовой теории заключается в обосновании новых мировоззренческих знаний о квантово-энергетических процессах в твёрдом веществе, которые принципиально отличаются от представлений, содержащихся в разделах физики «электричество, электрическая проводимость твёрдых тел» и классической химии – «электротехнические материалы». Особую значимость освоение этих знаний приобретает для совершенствования профессиональных компетенций и повышения энергоэффективности технологических устройств преобразования солнечной энергии в электрический ток.

Список литературы

1. Максимов А.Г. ВИЭ 2.0: Новая программа развития «зеленой» энергетики в России. *Энергетическая политика*. 2020;(11):22–27. https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_11153_22
2. Обухов С.Г. *Системы генерирования электрической энергии с использованием возобновляемых энергоресурсов*. Томск: Изд-во ТПУ; 2008. 140 с.
3. Лукутин Б.В. *Возобновляемые источники электроэнергии*. Томск: Изд-во ТПУ; 2008. 187 с.
4. Кухлинг Х. *Справочник по физике*. М.: Мир; 1982. 520 с.
5. Глинка Н.Л.; Ермаков А.И. (ред.). *Общая химия*. 30-е изд. М.: Интеграл-Пресс; 2002. 728 с.
6. Суркаев А.Л., Кумыш М.М., Zubovich С.О. *Физика. Часть VI. Квантовая и ядерная физика*. Волгоград: Изд-во ВПИ (филиал) ВолгГТУ; 2015. Вып. 3. 100 с. Режим доступа: https://volpi.ru/files/vpf/vpf_library/Ych_pos/6_kva.pdf?ysclid=134uaiutel
7. Колесниченко И.Е., Артемьев В.Б., Колесниченко Е.А., Любомищенко Е.И. *Квантовая теория энергетических процессов в молекулярных структурах угольного пласта*. М.: Горная книга; 2020. 40 с. Режим доступа: <http://www.gornaya-kniga.ru/catalog/2246>
8. Матвеев А.Н. *Молекулярная физика*. 4-е изд. СПб.: Лань; 2010. 368 с.
9. Кузнецов С.И. *Курс физики с примерами решения задач. Ч. II. Электричество и магнетизм. Колебания и волны*. 4-е изд. Томск: Изд-во ТПУ; 2013. 370 с.
10. Денисов А.Ю., Чукин А.В., Зенков Е.В., Денисова О.В. *Изучение туннельного эффекта с помощью полупроводникового туннельного диода*. Екатеринбург: Изд-во УрФУ; 2016. 31 с. Режим доступа: https://study.urfu.ru/Aid/Publication/13549/1/Denisov_hykin_Zenkov%20Denisova.pdf
11. Огородников А.И. *Физические основы электронной техники*. Екатеринбург: Изд-во УрФУ; 2011. 105 с. Режим доступа: <http://hdl.handle.net/10995/58594>
12. Тюрин Ю.И., Чернов И.П., Крючков Ю.Ю. *Физика. Квантовая физика*. Томск: Изд-во ТПУ; 2009. 320 с. Режим доступа: https://portal.tpu.ru/departments/otdel/publish/izdaniya_razrabotanye_v_ramkah_IOP/Tab/fizika_kvantovaya_fizika_zac.pdf
13. Richard C. Tolman and T. Dale Stewart. The Electromotive Force Produced by the Acceleration of Metals. *Physical Review*. 1916;8(2):97. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.8.97>
14. Парфенов В.В., Закиров Р.Х. *Физика полупроводников (элементы теории, руководство и задания к лабораторным работам)*. Казань: Изд-во КГУ; 2001. 80 с. Режим доступа: https://kpfu.ru/docs/F129512433/05_pp.pdf
15. Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К. *Солнечная энергетика*. М.: Издательский дом МЭИ; 2008. 317 с. Режим доступа: <https://www.c-o-k.ru/library/document/12813/35694.pdf>
16. Батенков В.А. *Электрoхимия полупроводников*. 2-е изд. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та; 2002. 162 с.

References

1. Maksimov A.G. RES 2.0: New program for the development of “green” energy in Russia. *Energy Policy*. 2020;(11):22–27. (In Russ.) https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_11153_22
2. Obukhov S.G. *Systems of electric power generation using renewable energy resources*. Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2008. 140 p. (In Russ.)
3. Lukutin B.V. *Renewable electrical energy sources*. Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2008. 187 p. (In Russ.)
4. Kikhling Kh. *Reference Book of Physics*. Moscow: Mir; 1982. 520 p. (In Russ.)
5. Glinka N.L.; Ermakov A.I. (ed.). *General Chemistry*. 30th ed. Moscow: Integral-Press; 2002. 728 p. (In Russ.)
6. Surkaev A.L., Kumysh M.M., Zubovich S.O. *Physics. Part VI. Quantum and nuclear physics*. Volgograd: Volzhsky Polytechnic Institute

- (branch) of Volgograd State Technical University; 2015. Iss. 3. 100 p. (In Russ.) Available at: https://volpi.ru/files/vpf/vpf_library/Ych_pos/6_kva.pdf?ysclid=l34uaiutel
7. Kolesnichenko I.E., Artemiev V.B., Kolesnichenko E.A., Lyubomishchenko E.I. *Quantum theory of energy processes in coal seam molecular structures*. Moscow: Gornoe delo; 2020. 40 p. (In Russ.) Available at: <http://www.gornaya-kniga.ru/catalog/2246>
8. Matveev A.N. *Molecular physics*. 4th ed. St. Petersburg: Lan; 2010. 368 p. (In Russ.)
9. Kuznetsov S.I. *A course in physics with examples of problem solving. Part II. Electricity and magnetism. Oscillations and waves*. 4th ed. Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2013. 370 p. (In Russ.)
10. Denisov A.Yu., Chukin A.V., Zenkov E.V., Denisova O.V. *Studies of the tunnelling effect using a semiconductor tunnelling diode*. Ekaterinburg: Ural Federal University; 2016. 31 p. (In Russ.) Available at: https://study.urfu.ru/Aid/Publication/13549/1/Denisov_hykin_Zenkov%20Denisova.pdf
11. Ogorodnikov A.I. *Physical fundamentals of electronics engineering*. Ekaterinburg: Ural Federal University; 2011. 105 p. (In Russ.) Available at: <http://hdl.handle.net/10995/58594>
12. Tyurin Yu.I., Chernov I.P., Kryuchkov Yu.Yu. *Physics. Quantum Physics*. Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2009. 320 p. (In Russ.) Available at: https://portal.tpu.ru/departments/otdel/publish/izdaniya_razrabotanye_v_ramkah_IOP/Tab/fizika_kvantovaya_fizika_zac.pdf
13. Richard C. Tolman and T. Dale Stewart. The Electromotive Force Produced by the Acceleration of Metals. *Physical Review*. 1916;8(2):97. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.8.97>
14. Parfenov V.V., Zakirov R.Kh. *Semiconductor Physics (theoretical points, guidelines and assignments for laboratory work)*. Kazan: Kazan Federal University; 2001. 80 p. (In Russ.) Available at: https://kpfu.ru/docs/F129512433/05_pp.pdf
15. Vissarionov V.I., Deryugina G.V., Kuznetsova V.A., Malinin N.K. *Solar power engineering*. Moscow: Moscow Power Engineering Institute; 2008. 317 p. (In Russ.) Available at: <https://www.c-o-k.ru/library/document/12813/35694.pdf>
16. Batenkov V.A. *Electrochemistry of semiconductors*. 2nd ed. Barnaul: Altai State University; 2002. 162 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Колесниченко Игорь Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительства и техносферной безопасности, заместитель директора – научный руководитель Шахтинского института, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова; г. Шахты, Российская Федерация; e-mail: kolesnichenko_igor@rambler.ru

Колесниченко Евгений Александрович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительства и техносферной безопасности Автодорожного института (филиала), Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова; г. Шахты, Российская Федерация; e-mail: kolesnichenko-2718@rambler.ru

Любомищенко Екатерина Игоревна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры проектирования и строительства автомобильных дорог Автодорожного института (филиала), Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова; г. Шахты, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9495-7385>; e-mail: katya87lk@mail.ru

Колесниченко Евгений Игоревич – студент кафедры проектирования и строительства автомобильных дорог Автодорожного института (филиала), Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова; г. Шахты, Российская Федерация; e-mail: z_kolesnichenko@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 23.04.2022

Поступила после рецензирования: 12.05.2022

Принята к публикации: 14.05.2022

Information about the authors

Igor E. Kolesnichenko – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Construction and Technogenic Safety Department, Deputy Director – Academic Advisor at the Shakhty Road Institute (branch), Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Shakhty, Russian Federation; e-mail: kolesnichenko_igor@rambler.ru

Evgeny A. Kolesnichenko – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor at the Construction and Technogenic Safety Department of the Shakhty Road Institute (branch), Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Shakhty, Russian Federation; e-mail: kolesnichenko-2718@rambler.ru

Ekaterina I. Lyubomishchenko – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Assistant Professor at the Motor Road Design and Construction Department of the Shakhty Road Institute (branch), Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Shakhty, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9495-7385>; e-mail: katya87lk@mail.ru

Evgeny I. Kolesnichenko – Student at the Motor Road Design and Construction Department of the Shakhty Road Institute (branch), Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Shakhty, Russian Federation; e-mail: z_kolesnichenko@mail.ru

Article info

Received: 23.04.2022

Revised: 12.05.2022

Accepted: 14.05.2022