

Глава 5. Проводници и електрично поле

5.1. Електротехнически материали

Електротехническите материали са тези от материалите използвани в електрониката и електротехниката, които притежават особени свойства по отношение на електромагнитното поле. Общото за тях е, че се експлоатират в условията на действие на електрично и/или магнитно поле. В тях протичат електрически токове, натрупва се електрическа или магнитна енергия, отделя се топлинна енергия, възможна е загуба на електрическа и/или магнитна енергия, извършва се нагряване на материалите.

Едни или други свойства на тези материали се оценяват по своите характеристики (параметри). За да може пълно да се оценят свойствата на един или друг електротехнически материал е необходимо да се знаят неговите механични, електрични, топлинни и физико-химични характеристики.

По предназначение материалите, използвани в различни обласни на електрониката условно се подразделят на конструкционни и електротехнически. Конструкционните материали се използват за направа на носещи конструкции, а също и спомагателни детайли и елементи на радио-приборите, работещи в условията на въздействие на механически натоварвания.

Приложението на електротехническите и радиотехнически материали в радиоелектрониката е обусловено преди всичко от техните електрически и магнитни свойства.

Електротехнически се наричат материалите, характеризиращи се с определени свойства по отношение на електромагнитното поле и прилагани в техниката с отчитане на тези свойства.

По поведение в електрическо поле материалите се подразделят на *проводникови*, *полупроводникови* и *диелектрически*.

Проводник – това е вещество, вътре в което при електростатическо равновесие електрическото поле е равно на нула, а ако полето е различно от нула, то в проводника възниква електрически ток.

Съобразно приложението те се делят на материали с висока проводимост (за проводници с различно предназначение, токопровеждащи детайли, електрически контакти) и материали с високо съпротивление (за резистори и нагревателни елементи).

5.1. Електротехнически материали

5.2. Природа на токоносителите в металите

5.3. Класическа теория за проводимост на металите

5.4. Зонна теория на твърдите тела

5.5. Електростатика на проводниците

Проводниците, използвани в съвременната техника, по агрегатно състояние се подразделят на газообразни, течни и твърди.

Към газообразните проводници се отнасят парите на веществата и газовете при такава стойност на интензитета на електричното поле, която осигурява начало на процеса на йонизация на молекулите. Йонизирания газ представлява проводник, в който токоносители са както електроните, така и йоните. Проводимостта на газовете и парите широко се използва в различни газоразрядни прибори.

Плазма – това е силно йонизиран газ, в единица обем на който броя на електроните е равен на броя на положителните йони.

Твърдите метали и техните сплави се наричат проводници с електронна проводимост или проводници от I род. Металите в твърдо състояние са кристални вещества, за които е характерна особен вид химична връзка наречена метална връзка между атомите. Електропроводимостта на металите, както в твърдо, така и в течно състояние е обусловено от токоносители, само електрони. Твърдите проводници са важни проводникови материали, широко използвани в радиотехниката и електрониката.

Към течните проводници се отнасят различни разтвори стопилки на соли, киселини, основи и други вещества, провеждащи електричния ток. Те са наречени електролити или проводници от II род. При преминаване на електричен ток през електролит, в който се потопени електроди, електрическите заряди се пренасят заедно с частици от молекулите (йоните) на електролита. На електродите се отлага вещество от разтвора. Електролитите широко се използват в техниката, в частност в технологиите за производство на различни елементи за радиоелектрониката.

Полупроводник – вещество, основното свойство на което е силната зависимост на неговата електропроводимост от външни фактори.

Диелектрик – вещество, основното електрическо свойство на което е способността да се поляризира в електрично поле и има голямо съпротивление при преминаване на електричен ток. Според приложението се различават пасивни диелектрици (електроизолационни) и активни диелектрици (сегнетоелектрици, пиезоелектрици и др.), свойствата на които могат да се управляват чрез външни енергетични въздействия.

Сред материалите, използвани в електротехническите

устройства и прибори, особено място заемат **сплавите с високи еластични свойства**, които се използват за еластични елементи (токопроводни пружини, окачвания, разпонки, мембрани и т.н.), и **сплави със специално топлинно разширение** (сплави от инварен тип, желязо с 36% никел). Различават се сплави с минимален коефициент на линейно разширение, предназначени за детайли на прибори с повишени изисквания за постоянни линейни размери при изменение на температурата, и сплави със зададен коефициент на линейно разширение - за създаване на вакуумплътни спойки с други материали (стъкло, керамика и т.н.).

По отношение към магнитното поле всички материали притежават магнитни свойства. Те притежават способността при внасянето им в магнитното поле да се намагнитват, а някои от тях съхраняват своята намагнитеност и след прекратяване въздействието на магнитното поле. В зависимост от магнитната проникваемост магнитните материали се делят на диамагнетици, прамагнетици и феромагнетици.

По отношение на магнитното поле повечето електротехнически материали са немагнитни или слабо-магнитни вещества. Съществува особена група материали, проявяващи силни магнитни свойства.

Магнитните материали са способни силно се намагнитват във външно магнитно поле. В зависимост от особеностите на процеса на намагнитване, свързани с техния строеж, те се делят на феромагнетици и феримагнетици (ферити). Различават се магнитномеки и магнитнотвърди материали. **Магнитномеките** материали лесно се пренамагнитват. Те се използват в електромагнитите и променливите магнитни полета в качеството на сърцевини за трансформатори, магнитопроводи на електрически машини, релета и т.н. **Магнитнотвърдите** материали трудно се размагнитват, притежават голям запас от магнитна енергия; те се използват за изготвяне на постоянни магнити и устройства за записи и съхранение на информация.

Електропроводимост. Механизмите на електропроводимостта са най-разнообразни. Общото между тях се явява неразривната връзка с движението на зарядите. В зависимост от механизма на електропроводимост, свойствата на веществата и условията на протичане на електрическия ток закономерностите, описващи електропроводимостта варират в широки граници.

Под електропроводимост (електрическа проводимост,

проводимост) се разбира способността на веществата (телата) или средата да провежда електрически ток. Това свойство на веществата определя възникването в тях на електрически ток под действие на електрично поле.

Електропроводимост означава също физична величина, характеризираща тази способност и обратна на електрическото съпротивление. Тази физична величина е **специфичната електропроводимост** - γ (S/m), като коефициент на пропорционалност между плътност на тока j (A/m²) и интензитета на електрическото поле E (V/m) в закона на Ом.

$$j = \gamma E. \quad (5.1)$$

Специфичната електропроводимост зависи само от свойствата на материала. Тази характеристика обикновено използват в теорията. На практика, за оценка на електропроводимостта на материалите и системите по широко се използва обратната величина - **специфично електрическо съпротивление** - ρ ($\Omega \cdot m$),

$$\rho = \frac{1}{\gamma}. \quad (5.2)$$

За основните групи електротехнически материали стойността на ρ е следната:

- проводници - $\rho < 10^{-5} \Omega \cdot m$
- диелектрици - $\rho > 10^8 \div 10^{16} \Omega \cdot m$
- полупроводници - $\rho = 10^{-5} \div 10^8 \Omega \cdot m$

В Международната система единици (СИ) измерителна единица на електрическата проводимост е *сименс* (българско означение **См**; международно **S**) определен като $1 S = 1 \Omega^{-1}$, т.е. като електрическа проводимост на участък от електрическа верига със съпротивление 1Ω .

Електропроводимостта по определение е непосредствено свързана с електрическия ток. *Електрическият ток е явление, което се възбужда от електрическо поле в материална среда при определени условия. Това явление представлява насочено движение на носители на електрични заряди.*

От горното следва, че за възникване и съществуване на електрически ток е необходимо, 1) наличие на свободни *носители на ток* – заредени частици, способни да се преместват насочено (табл.5.1), и 2) наличие на *електрическо поле*, енергията на което да се изразходва за движението на носителите на тока.

Таблица 5.1.

Носители на електрически заряди

Клас на материала	Носители на електрически заряди
Проводници	Свободни електрони
Електролити	Положителни и отрицателни йони
Газове	Свободни електрони, положителни и отрицателни йони
Полупроводници	Положително заредени р-носители (дупки), отрицателно заредени п-носители (свободни електрони)

5.2. Природа на токоносителите в металите

За изясняване на природата на токоносителите в металите са били проведени редица опити.

Опит на Е. Рике. През 1901 г. Едуард Рике е направил следния опит. Рике взема три цилиндъра - два медни и един алуминиев - с прецизно шлайфани основи. След претегляне цилиндрите били подредени заедно в следната последователност: мед - алуминий - мед (фиг.5.1). През такъв съставен проводник е пускан непрекъснато ток в едно и също направление в продължение на една година. За това време през цилиндрите е преминал заряд, равен на $3,5 \cdot 10^6$ С. Претеглянето е показало, че пропускането на тока не е оказало влияние на теглото на цилиндрите. При изследване на допиращите се краища под микроскоп не е забелязано проникване на единия метал в другия. Резултатите от опита свидетелствали за това, че пренос на заряда в метала се осъществява не от атоми, а от някакви частици, влизащи в състава на всички метали. такива частици биха могли да бъдат откритите през 1897 г. от Джоузеф Томсън електрони.

За да се отъждествят токоносителите в металите с електроните, е било необходимо да се определи знака и числовише стойности на специфичния заряд на носителите. Опитите, направени с тази цел, са се основавали на следните съображения. Ако в металите има способни да се преместват заредени частици, то при спиране на металния проводник тези частици трябва определено време да продължават да свижат по инерция, в резултат на което в проводника възниква токов импулс и ще бъде пренесен определен заряд.

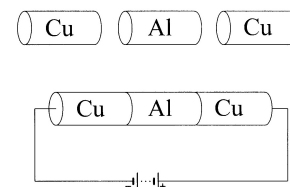
Опит на Н. Папалекси и Л. Манделъштам. През 1913г. те провели качествени наблюдения въз основа на така наречения *електроинерционен ефект*: ако рязко се спре движещ се проводник, то в него ще възникне кратковременен импулс на тока. Ефекта се обяснява с това, че в продължение на малка време след спирането на проводника, неговите свободни заряди продължават да се



Carl Victor Eduard Riecke
(1845-1915)

Едуард Рике е роден на 1 декември 1845 г. в германския град Штутгарт. Изучава физика в политехническият институт в Штутгарт и Тюбинген. През 1870 постъпва в Гьотингенския университет. След година (1871) завършва учебното заведение със степен доктор по философия и работи в университета до края на живота си като професор, директор на Физическия институт, а от 1909 г. е член-кореспондент на Баварската академия на науките.

Наред с обучението на студентите той се занимавал с експериментална дейност в областта на електричеството, термо и хидродинамиката, физикохимия и др.



Фиг.5.1. Опит на Е. Рике



Николай
Дмитриевич
Папалекси
1880-1947



Леонид
Исаакович
Манделъштам
1899-1944

движат по инерция.

Бобина е закрепена чрез кварцова нишка и се привежда в странични трептения (фиг.5.2). Ускорението на електроните се предизвиква от механично движение. При спиране на движението, свободните заряди продължават да се движат по инерция. Към бобината е включена телефонна слушалка в която се чува пукане, следователно, през нея протича ток.

Мандельштам и Папалески не са получили никакви количествени резултати и резултати от техните опити не са публикувани

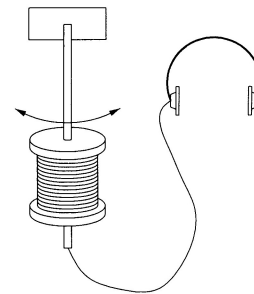
Опит на Р. Толман и Ст. Бътлър. Пряко експериментално доказателство за това, че електричният ток в металите е резултат от движението на свободните електрони, била дадено в опита на Р. Толман и Ст. Бътлер, проведен през 1916 г.

При своя опит те не само наблюдавали споменатия електроинерционен ефект, но и са извършили редица измервания и изчисления.

Постановката за експеримента на Толман и Бътлер е показана на фиг.5.3. Бобина с голям брой навивки от метален проводник се привежда в бързо въртене около своята ос. Краищата на намотката с помощта на плъзгащи контакти са съединени към прецизен галванометър, който дава възможност да се измерва минаващия през него заряд. След рязко спиране на бобината във веригата възниква токов импулс. Посоката на тока е приета при положение, че тока е предизвикан от движението на *отрицателните* заряди. Измервайки с чувствителен галванометър сумарния заряд преминаващ през веригата, Толман и Бътлър изчислили отношението q/m заряда на една частица към нейната маса. То се оказало равно на отношението e/m за електрона, което през това време е било добре известно:

$$\frac{q}{m} = 1,8 \cdot 10^{11} C / kg = \frac{e}{m}.$$

Така било окончателно изяснено, че *носителите на свободни заряди в металите се явяват свободните електрони*. Този добре известен факт бил установен сравнително късно - отчитайки, че метални проводници към тогавашния момент вече повече от сто години активно се използват в разнообразни експерименти по електромагнетизъм.



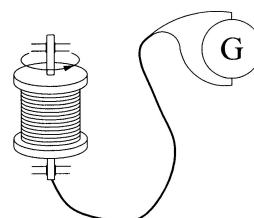
Фиг.5.2. Опит на Мандельштам и Папалекси



Richard
Chace
Tolman
1881-1945



Stuart
Thomas
Butler
1926-1982



Фиг.5.3. Опит на Толман и Бътлер

5.3. Класическа теория за проводимост на металите

Предпоставки за създаването. Представите за дискретен строеж на електричеството се появяват през втората половина на XIX в. За пръв път за това се споменава в трудовете на Джордж Джонстон Стони (англ. *George Johnstone Stoney 1826-1911*) - британски ирландски физик и математик, който въвежда в науката термина "електрон", определяйки го като "фундаментална единица за измерване на електроенергията".

Идеята за атомния строеж на електричеството произлиза от законите за електролизата на Фарадей. Максвел също е говорил за "молекули електричество", но е считал, че това понятие ще бъде отхвърлено с развитието на теорията за полето.

През 1874 г. Джордж Стони пръв формулирал теорията за дискретността на електричеството. Пръв предлага количествена оценка (от закона за електролизата) на минималния електрически заряд в размер на 10^{-20} С (при $1,6 \cdot 10^{-19}$ С), която се оказва занижена 16 пъти.

Приоритета на откриването на електрона разбира се принадлежи на английския физик Джоузеф Томсън (*Joseph Thomson, 1856-1940*), който през 1897г. открил електрона, а през 1898 г. определил неговия заряд чрез пропускане на капки заредено масло - $1,592 \cdot 10^{-19}$ С.

Немския физик Паул Друде (*Paul Drude, 1863-1906*) през 1900 г. полага началото на класическата теория за проводимостта на металите, която холандският физик Хендрик Лоренц (*Hendrik Lorentz, 1853-1928*) развива през 1904 г. Заслужава да се отбележи, че теорията е създадена преди опитното доказателство на електронната проводимост на металите.

Предпоставки на теорията. В основата на теорията на Друде-Лоренц стои кинетичната теория на газовете, закономерностите на поведение на идеалния газ. Счита се, че свободните електрони в металите се подчиняват на законите на идеалния газ.

Тази теория се прилага със следните приемания:

- движението на електроните се подчинява на законите на класическата механика на Нютон;
- пренебрегва се взаимодействието на електроните помежду им;
- взаимодействието на електроните с йоните има



Sir Joseph John Thomson
(1856-1940)



Paul Karl Ludwig Drude
(1863-1906)

характер на удар.

О гледна точка на класическата теория голямата електропроводимост на металите се обяснява с наличието на огромен брой токоносители – свободни електрони, движейки се по целия обем на проводника (фиг.5.4).

Съгласно класическата термодинамика, средната енергия на постъпателното топлинно движение на частиците на веществата зависи само от температурата T , но не от химическата природа и е равна на:

$$\frac{m_e \langle v_T^2 \rangle}{2} = \frac{3}{2} kT, \quad (5.3)$$

където m_e и v_T са съответно масата и средната квадратична скорост на хаотичното движение на електрона, k - болцмановата константа и T - абсолютната температура на металния проводник.

От (4.6) намираме средноквадратичната скорост на хаотичното движение на частиците:

$$v_T = \sqrt{\frac{3kT}{m_e}}. \quad (5.4)$$

Като вземем пред вид масата на електрона $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$ kg, константата на Болцман $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K, при стайна температура $T = 300$ K намираме средноквадратичната скорост на хаотичното движение на частиците

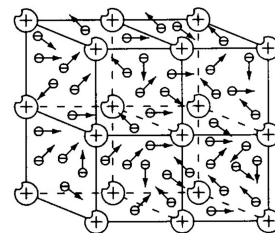
$$v_T = \sqrt{\frac{3kT}{m_e}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{9,109 \cdot 10^{-31}}} = 116768,43 \approx 10^5 \text{ m/s}$$

Топлинното движение на електроните вследствие на своята хаотичност не може да доведе до възникване на електричен ток.

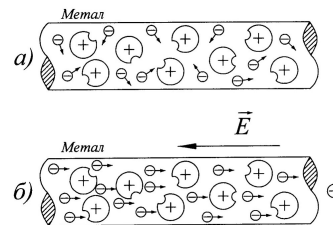
Под действие на външно електрично поле в метален проводник (фиг.5.5,б) възниква насочено движение на електрони, т.е. електричен ток. Плътноста на тока j е равна на общия заряд на всички електрони, преминаващи за една секунда през единица площ от напречното сечение на проводника. Тези електрони са затворени в обем на цилиндър (фиг.5.6), площта на основата на който е равна на единица $S = 1$, и височина – средната скорост $\langle v_E \rangle$ на насоченото движение на електроните под действие на външното електрическо поле. Ако в единица обем се намират n_0 електрони, то числована стойност на плътността на тока ще бъде

$$j = n_0 e \langle v_E \rangle. \quad (5.5)$$

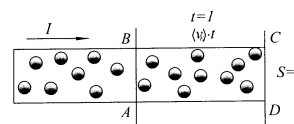
От горния израз може да се определи скоростта на насоченото движение на електроните (дрейфова скорост). За



Фиг.5.4. Йони и електрони в кристалната решетка на металите



Фиг.5.5. Движение на електроните без и при наличие на електрично поле



Фиг.5.6. Към определяне плътността на тока

проводник от определен материал и зададено сечение съществува максимално технически допустимо натоварване, превишението на което води до опасност от прегряване на проводника. Например, за изолиран меден проводник със сечение от 1 mm^2 най-голямата допустима плътност на тока е равна на $11 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$. Тъй като за медта обемната плътност на електроните на проводимостта $n_0 \approx 8,5 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$, а абсолютната величина на заряда на електрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, то по формула (5.5) средната скорост $\langle v_E \rangle$ на движение на електроните при тези условия ще бъде:

$$\langle v_E \rangle \approx \frac{11 \cdot 10^6}{8,5 \cdot 10^{28} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 8 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

По такъв начин, средната скорост на насоченото движение на електроните, съответстваща на електрическия ток в проводника е много малка в сравнение със средната скорост на топлинното движение при обикновени температури. Незначителната средна скорост $\langle v_E \rangle$ се обяснява с много честите удари на електроните с йоните на кристалната решетка.

Класическата електронна теория се натъква на непреодолими противоречия с опита. Тази теория е била развита първоначално при въвеждане на редица опростявания. Например било прието, че всички електрони имат еднаква скорост на хаотичното движение. Всъщност скоростите са различни, поради което е било прието определено статистическо разпределение (на Максвел-Болцман), което също не се съгласува с опитните данни.

Опитно е установено, че специфичната проводимост е обратно пропорционална на температурата $\gamma \sim 1/T$, а според електронната теория $\gamma \sim 1/\sqrt{T}$. Това противоречие на теорията с опита не може да се избегне с някакво обосновано предположение.

Класическата теория има и други противоречия, но тя има и днес значение в случай на малка концентрация на на свободните електрони (при полупроводниците) тя дава напълно задоволителни резултати.

5.4. Зонна теория на твърдите тела

За разрешаване проблемите на класическата електронна теория е било необходимо да се създаде нова теория на твърдото тяло. Такава теория е била създадена през 1927-

**Принцип на Паули.* Този принцип е бил предложен от австрийския физик Волфганг Паули през 1925 г. за описание поведението на електроните. През 1940 г. той разширява принципа

1928 г. в резултат на използване постановките на току що създадената квантова механика. В нея на елементарната частица се приписват не само корпускулярни но и вълнови свойства. Новата теория на твърдите тела получила наименованието квантова електронна теория на твърдото тяло или зонна теория на твърдото тяло.

Енергийни нива на атома. В съответствие с квантовата механика свободните електрони във вакуум могат да имат всякаква енергия, т.е. техния енергиен спектър е непрекъснат.

Ако електроните принадлежат на атоми, то тяхната енергия се квантува – те имат определени дискретни стойности на енергията, наречени нива на енергията (фиг.5.7). Квантовата теория забранява на електроните да заемат междинни нива на енергията.

На всяка стойност на енергията съответства хоризонтална линия, прекарана на височина $E_i (i = 0, 1, 2, \dots)$. Такава съвкупност от дискретни нива на енергията на атома образува неговия *дискретен енергиен спектър*.

Всяка физическа система в свободно състояние трябва да притежава минимум възможна енергия. При това трябва електроните да се намират на най-ниското ниво. Но електроните се подчиняват на принципа на Паули. Следователно на най-ниското ниво в атома могат да се разместят само два електрон, останалите запълват по двойки по-високите нива.

Състоянието на електрона в атома еднозначно се определя от набор от четири квантови числа.

Таблица 5.2

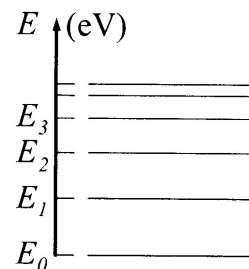
Главно квантово число	n	Определя номера на енергийното ниво и на електронния слой и характеризира енергията на електроните	$n = 1, 2, 3, \dots$
Орбитално квантово число	l	Определя ъгловото разпределение на електроните и характеризира формата на орбиталите	$l = 0, 1, 2, 3, \dots$
Магнитно квантово число	m	Определя броя на орбиталите, броя на електроните на орбитала и пространственото разположение на орбиталите	При l $m = 2l + 1$
Спиново квантово число	m_s	Свързано е със собственото въртене на електроните при което възниква механичен (спин) и магнитен момент	$m_s = \pm 1/2$

Всички електрони с дадено главно квантово число n образуват електронен слой, съдържащ $2n^2$ електрона. Получават се n -слоеве, които се означават с главни латински букви (фиг.5.8). Във всеки електронен слой състоянията с дадено орбитално квантово число образуват съответен s -, p -, d -, f - и т.н. подслой.

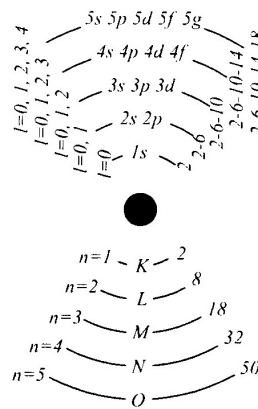
до всички фермиони**. Принципа на изключването на Паули е един от най-важните принципи в квантовата физика, поради това, че основните видове частици от които е изградена обикновената материя (електрони, протони и неутрони) се подчиняват на този принцип.

Принципа на Паули гласи: на едно енергетично ниво не могат да се намират повече от два електрона, при това техните собствени моменти на импулса (спинове) трябва да са в противоположни посоки.

****Фермиони** - всички елементарни частици с полуцел спин ($1/2, 3/2, 5/2, \dots$) като електрон, протон, неутрон и др. Кръстени са на известния физик Енрико Ферми.



Фиг.5.7. Дискретен енергиен спектър на атома

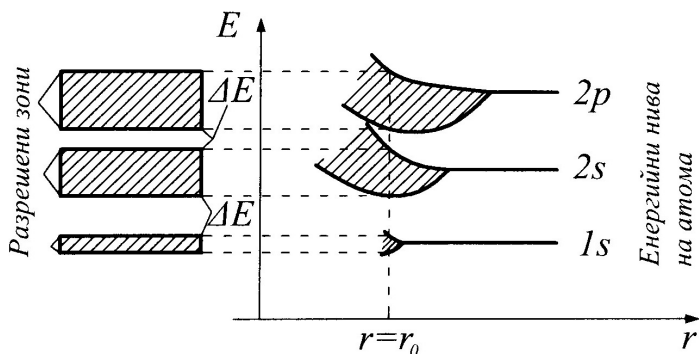


Фиг.5.8. нива и поднива на електроните

Енергийни зони. Енергията на електроните се квантува не само в атомите, но също и в кристалите.

Разглеждаме мислено процеса на образуване на кристала посредством сближаването на отделните атоми. Да разгледаме обединение от N атоми в кристал. Всички N атоми са еднакви и имат еднакъв набор от дискретни енергийни нива. При сближаване на атомите поради тяхното взаимодействие вместо едно еднакво за всички атоми ниво възникват N близки нива – образува се енергийна **зона**. Отук произлиза и наименованието зонна теория на твърдите тела.

На фиг.5.9 са показани енергийните нива на атома, а то ляво – разширение на нивата в ленти при образуване на кристална решетка. По хоризонталната ос е нанесено разстоянието между атомите r . С r_0 е означено равновесното разстояние между атомите на решетките на кристала.



Фиг.5.9. Енергийни нива и зони

Съвкупността от нива, образувани при разцепване на едно енергетично ниво на атома в поле от $(N-1)$ взаимодействащи с него атоми образуват **зона**, или лента от **разрешени енергии**.

Енергийните интервали ΔE между разрешените зони представляват енергия, която електроните на дадено вещество не могат да придобият. Те се наричат **забранени зони** (band gap).

Разрешените зони са валентната зона (Valence Band) и зона на проводимост (Conductivity Band). Валентната зона е енергийна област от разрешени електронни състояния в твърдото тяло напълно или частично запълнена с електрони. Зоната на проводимост в зонната теория на твърдото тяло е първата от незапълнените с електрони зона в полупроводниците и диелектриците. Електроните от валентната зона, преодолявайки забранената зона, при

ненулева температура попадат в зоната на проводимостта, т.е. преместват се под действие на електрическото поле.

В зависимост от степента на запълване на валентната зона с електрони и ширината на забранената зона ΔE всички вещества се делят на **проводници, полупроводници и диелектрици**.

На фиг.5.10 са показани варианти на запълване на енергетични зони с атоми.

В случай *а)* ляво електроните запълват частично валентната зона и в нея има свободни състояния.

При това е достатъчно да предадем на електроните, намиращи се на високите нива, малка енергия за да ги приведем на по-високи нива. Такива електрони могат да се ускорят от електрическо поле и да участват в образуването на ток. По този начин, **кристали с частично запълнена валентна зона** добре провеждат електричен ток. Кристал с такава схема на енергийни нива представлява **метал**. Така, че всички метали са проводници.

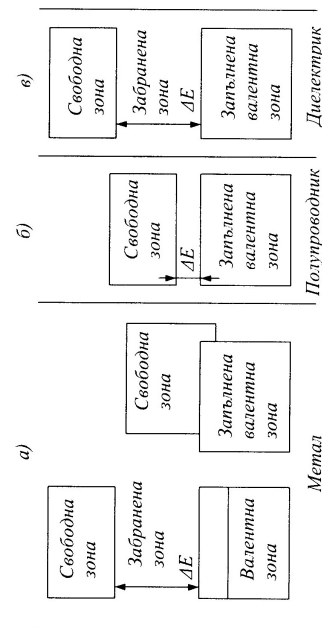
Частично запълване на валентната зона (в случая при метал я наричат **зона на проводимост**) може да стане, ако кристалите се образуват от атоми, при които на последното заето ниво има само един електрон (напр. *Li*), или в общия случай – нечетен брой електрони (напр. *Al*, *Ga* и др. метали).

При проводниците зоната на проводимост и валентната зона могат да се **припокриват** (фиг.5.10,*а* дясно), образуват една зона, наречена зона на проводимост. В този случай кристала може да бъде метал и при четен брой валентни електрони (напр. *Ca*, *Zn*, *Mg* др).

В случаите, изобразени на фиг.5.10,*б,в*, **нивата на валентната зона са напълно заети от електрони** - зоната е запълнена. Това е при полупроводници и диелектрици.

При полупроводниците зоните на се припокриват и разстоянието между тях (ширина на забранената зона) $\Delta E \geq 3,5 \text{ eV}$. При температура $T = 0 \text{ K}$ в зоната на проводимост няма електрони, а валентната зона е запълнена с електрони, които не могат да изменят своето квантовомеханично състояние, т.е. не могат да се движат насочено при прилагане на електрично поле. Затова при $T = 0 \text{ K}$ собствените полупроводници не провеждат електричен ток. С повишаване на температурата проводимостта на тези полупроводници се повишава.

При изолаторите (диелектриците) зоните не се припокриват и разстоянието между тях (ширина на забранената зона) $\Delta E \leq 3,5 \text{ eV}$. При това положение за да



Фиг.5.10. Зони на проводници, полупроводници и диелектрици

премине електрон от валентната зона в зоната на проводимост е необходима значителна енергия (температура), така че диелектриците при невисока температура практически не провеждат ток.

Разделението на веществата на полупроводници и диелектрици е съвсем условно затова материали с шочина на забранената зона над 3-4 eV и под 4-5 eV понякога се отнасят към широкозоновите полупроводници – материали притежавайки свойствата и на полупроводници и на диелектрици.

5.5. Електростатика на проводниците

Разглеждайки свойствата на проводниците в електростатично поле (електростатика на проводниците) можем да разграничим два случая:

1. Поле на зареден проводник – в този случай (фиг.5.11,а) проводника е зареден с определен заряд, и в околното пространство се появява електростатично поле, създавано от този зареден проводник.

2. Проводници във външно електрично поле - в този случай (фиг.5.11,б) незареден проводник се внася в електростатично поле, под действието на което на отделни участъци от повърхността на проводник от повърхността на проводника се индуцират електрически заряди с различен знак така, че сумарния заряд на проводника остава равен на нула. Индуцираните заряди със своето поле изкривяват първоначалното електрично поле.

Поле на зареден проводник. За разгледаните два случая формулираме основните свойства на проводниците в електростатично поле:

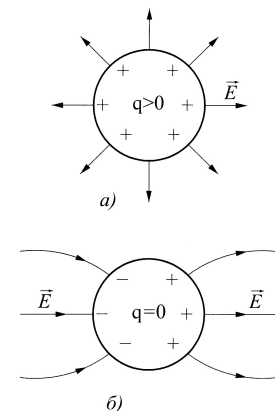
1. *Електростатично поле вътре в проводника липсва.*
Условието

$$\vec{E} = 0 \quad (5.6)$$

вътре в проводника в електростатиката винаги трябва да е изпълнено. Действително, ако в проводника остане някакво поле, то под неговото действие свободните заряди трябва да се движат дотогава, докато се разположат в проводника така, че със своето поле да компенсират до нула резултантното електростатично поле в проводника.

Преразпределението на зарядите в проводника и установяването на стационарни условия става за много кратко време: приблизително 10^{-10} s.

2. *Потенциала на всички точки от проводника е еднакъв.*
Действително, ако се вземат две произволни точки от



Фиг.5.11. Поле на зареден проводник и проводник във външно поле

проводника 1 и 2 и се съединят с линия, лежаща вътре в проводника, то по определение потенциалната разлика с отчитане, че вътре в проводника $\vec{E} = 0$, ще получим

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \sum_l E_l \Delta l = 0, \quad (5.7)$$

или

$$\varphi_1 = \varphi_2. \quad (5.8)$$

От тука следва, че повърхността на проводника в електростатично поле представлява екипотенциална повърхност, и линиите на интензитета на полето \vec{E} извън проводника са насочени по нормалата към неговата повърхност.

3. *Електрическите заряди се разполагат само на повърхността на проводника.* Липсата на електрически заряди вътре в обема на проводника може да се докаже, използвайки теоремата на Гаус. Ако вътре в проводник прекараме произволна затворена повърхност S , то потокът на електричната индукция Φ_E през S ще бъде също равен на нула:

$$\Phi_E = \sum_{i=1}^n E_n \Delta S_i = 0, \quad (5.9)$$

то съгласно теоремата на Гаус

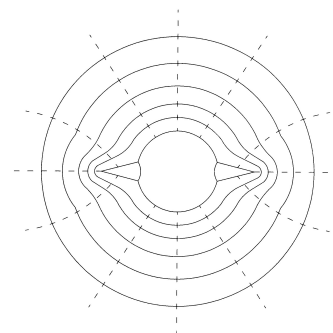
$$\Phi_E = \frac{\sum q}{\epsilon_0}, \quad (5.10)$$

тъй като за всеки елемент $E_n = 0$. От горните две равенства следва, че

$$\sum q = 0, \quad (5.11)$$

т.е. алгебричната сума на електричните заряди вътре в областта, обхваната от повърхността, е също нула. Тъй като затворената повърхност е произволна, следва, че изобщо вътре в проводника няма некомпенсирани електрични заряди. Некомпенсирания електрически заряд винаги е разположен на повърхността на проводника с определена повърхностна плътност σ на заряда. От гледна точка на микроскопическата теория излишния заряд се намира в тънък слой до повърхността на проводника с дебелина само няколко атомни слоя.

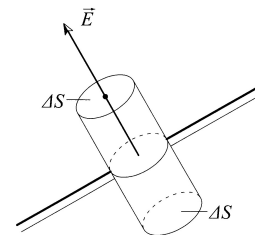
4. *Извън проводника силовите линии на електростатичното поле в близост до повърхността са перпендикулярни на нея.* Разглеждаме поле, създавано от изображения на фиг.5.12 зареден проводник. На големи разстояния от проводника екипотенциалните повърхности имат характерна за точкови заряд форма на сфера (на фигурата поради недостиг на място сферичната повърхност



Фиг.5.12. Силови и екипотенциални повърхнини на зареден проводник

е изобразена на малки разстояния от проводника; с пунктир са показани линиите на интензитета на полето). При приближаване към проводника екипотенциалните повърхности стават все по-сходни с повърхността на проводника, която е екипотенциална. В близост до изпъкналите конуси екипотенциалните повърхности са по-гъсти, което означава, че и интензитета на полето е по-голям. От това следва, че плътността на зарядите на изпъкналостите е особено голяма. До такъв извод може да се стигне, отчитайки че поради взаимното отблъскване зарядите се стремят да се разположат възможно най-далече един от друг.

5. *Интензитета на полето на зареден проводник близо до повърхността е пропорционален на повърхностната плътност на заряда.* Трябва да намерим връзката между повърхностната плътност σ в една точка от повърхността на проводника и интензитета на електростатичното поле E във вън от проводника, непосредствено близо до точката. Предполагаме, че проводникът се намира в еднороден изотропен диелектрик. Построяваме около елементарната площ ΔS от повърхността на проводника цилиндър с образуващи, перпендикулярни на ΔS . Едната от основите е вътре, а другата извън проводника (фиг.5.13). Доколкото извън проводника, полето е перпендикулярно на повърхността, а вътре просто го няма $E = 0$, то потока на вектора интензитет на полето се изчислява лесно:



Фиг.5.13. Зависимост на интензитета от повърхностната плътност на зарядите

$$\Phi_E = \sum_{i=1}^n E_n \Delta S_i = E \cdot \Delta S. \quad (5.12)$$

Пълния заряд е равен на произведението от повърхностната плътност на заряда σ и площта на елемента ΔS :

$$\sum q = \sigma \Delta S. \quad (5.13)$$

Съгласно теоремата на Гаус

$$\Phi_E = \frac{\sum q}{\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \sigma \cdot \Delta S. \quad (5.14)$$

От (5.12) и (5.14) след приравняване на двете страни се получава: $E \cdot \Delta S = 1/\epsilon_0 \cdot \sigma \cdot \Delta S$

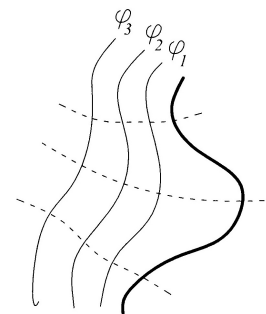
От тук след съкращаване на ΔS получаваме:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}. \quad (5.15)$$

Формула (5.15) показва, че интензитетът на електричното поле в една точка близо до повърхността на проводника, който създава полето, е пропорционален на повърхностната плътност на електричните заряди в тази точка.

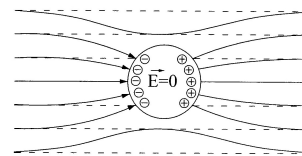
6. *Плътността на повърхностния заряд на проводника*

зависи от нейната кривина. Близо до вдлъбнатини в проводника екипотенциалните повърхности са разположени по нарядко (фиг.5.14). Съответно интензитета на полето и плътността на зарядите на тези места са по-малки. Въобще, плътността на зарядите при даден потенциал на проводника се определят от кривината на повърхностите – тя расте с увеличаване на положителната кривина (изпъкналост) и намалява с увеличаване на отрицателната кривина (вдлъбнатост). Особено голяма е плътността на зарядите при остриета. Поради това интензитета на полето близо да остриета може да бъде толкова голяма, че възниква йонизация на молекулите на газа, около проводника.



Фиг.5.14. Неравности по проводник и екипотенциални повърхнини

Проводници във външно електрично поле. При внасяне на незареден проводник в електрично поле носителите на заряда преминават в движение: положителните в посока на вектора \vec{E} , отрицателните – в противоположна посока. В резултат в краищата на проводника възникват заряди с противоположен знак, наречени индуцирани заряди (фиг.5.15); с пунктир са показани линиите на интензитет на външното поле). Полето на тези заряди е насочено противоположно на външното поле. Следователно, натрупването на заряди в краищата на проводника води до отслабване на полетата в него. Преразпределението на носителите на заряда става до тогава, докато не бъдат изпълнени условията (5.6) и (5.7), т.е. докато интензитета на полето вътре в проводника не стане равно на нула, а линиите на интензитета извън проводника перпендикулярни към неговите повърхности (вж. фиг.5.15). Следователно, неутралния проводник, внесен в електрично поле, прекъсва част от силовите линии на интензитета – те завършват на отрицателни индуцирани заряди и отново започват от положителните.



Фиг.5.15. Проводник във външно поле

Индуцираните заряди се разпределят по външната повърхност на проводника. Ако вътре в проводника има кухина, то при равновесно разпределение на зарядите на полето вътре в нея също се приравняват на нула. На това се основава електростатическата защита. Когато някой прибор трябва да се защити от въздействие на външни полета, той се поставя в подходяща кутия (екран). Външното поле се компенсира вътре в екрана от възникналите на неговата повърхност индуцирани заряди. Подобен екран действа добре и в случай когато се изработи не плътен, а във вид на гъста мрежа.