

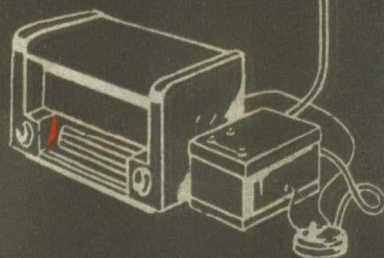
苏联科学院院士A.Φ.約飞著

陈 嘉 楨 譯
涂 象 初

半导体

(修 訂 本)

人民邮电出版社



半 导 体

(修 訂 本)

苏联 A. Ф. 約飞著

陈 嘉 楨 譯
涂 象 初

人 民 邮 电 出 版 社

А. Ф. ИОФФЕ
ПОЛУПРОВОДНИКИ И
ИХ ПРИМЕНЕНИЕ
ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
1956

内 容 提 要

本书扼要地介绍半导体的性能，各种半导体在工业和日常生活中的广泛应用，例如热敏电阻、光敏电阻、温差电池、整流器、晶体管、冷却器等。书中最后概括地介绍了现代有关半导体学说的动态以及存在的问题。

本书初版由陈嘉楨译出，这次由涂象初在原有基础上根据该书第二版删减、补译而成。

半 导 体 (修訂本)

著 者： 苏 联 А. Ф. ИОФФЕ
譯 者： 陈 嘉 楨 涂 象 初
出版者： 人 民 邮 电 出 版 社
北京东四大街13号

(北京市书刊出版业营业登记证出字第048号)

印刷者： 北 京 市 印 刷 一 厂
发行者： 新 华 书 店

开本 787×1092 1/32 1956年8月北京第一版
印张 1.28/32 页数 20 1963年3月北京修订版
印刷字数 43,000 字 1963年3月北京修订版第四次印刷
印数 73,411—114,410 册

统一书号：15045·总444—无71

定价：(9) 0.22 元

序 言

在19世紀及20世紀初叶，电工学、随后是物理学都对金属和电介质进行了研究，并利用金属来传导电流，用电介质作电絕緣。

近几十年来，技术上要求解决許多問題，要解决这些問題需要許多新的方法和材料。这样便产生了各种耐热合金、超硬合金、輕合金、塑料、有机玻璃、泡沫玻璃、新穎建筑材料。除金属及絕緣体外，在电气工业中又加入了許多半导体。

一伏电压在一立方厘米金属体内所产生的电流可达几十万安，而絕緣体中在相同条件下，則不到十亿分之一安。半导体消除了金属与絕緣体間的悬殊情况。

对半导体材料的研究表明，这种数量上的差别与許多新的特性有关，这些特性已在技术中得到了各种各样的应用。对这类技术过程的物理实质的闡明，使半导体理論深入了，并揭露了可以解决許多新技术任务的进一步事实。

只要略举几个工业上可用半导体解决的技术問題，就能看出它在国民經济中的意义了。半导体可以：1)把交流电变成直流电，2)代替电子管放大高频振盪及发生无线电波，3)调节电流强度及电压，4)保护高压輸电綫，避免过压及雷击，5)解决各种各样自动操纵及远距离控制的任务，6)測定室內溫度及照度，7)能用信号报告几十公里外有发光体和发热体存在，8)不用机械，将热能变成电能，9)利用电流生热或致冷，10)集中电能与磁能，11)将声能变成电能及将电能变成声能，12)将紫外线变成可見光綫以及将一种色调的光变为另一种光，13)貯备光能，按照信号将它重新放出，14)把太阳能和放射性射綫

能变成电能，15)在无线电工程的电真空器件中作为电子流的泉源，16)将极其微弱的电子束放大到几百万倍，17)在化学制造中起催化剂作用，18)作为核子微粒的计数器。

这样的例子还很多，然而从半导体的上述用途中已能估量出它在现代技术中各种各样的重要作用了。

同时，半导体的研究又以电现象的新概念和新定律充实了物理学，阐明了电荷与物质的连系，并阐明了固体中原子之间和分子之间的结合力的本质。

半导体在国民经济中的运用以及根据研究半导体的实验而使进一步深入了解其物理概念才刚开始。虽然才走了第一步，但这第一步已使我们能预见到，在不久的将来这种发展将使我们的技术面貌整个改观。例如，可以预料到大部分蒸汽机、冷却器及发电机、甚至取暖系统将作为半导体的温差电偶所代替，无线电技术将由电真空器件过渡到半导体器件，而这样一来可把它们的尺寸和价值减小到目前的几十分之一。用简单易行的办法就可以使生产中的所有过程都广泛实行自动化，并由一个中心来控制这些过程，从而大大提高劳动生产率。白天所贮备下来的光将用作晚间照明。利用日光将可发出电能，供给无线电接收机与日常其他用途。由某些放射性射线中可以获得电能。

半导体在现代物理学和技术中所占的这种地位和其各种尚未见诸应用的用途，都是由于它具有其他物质中没有的特性所致。

现在我们就来试述一下这些特性，并了解一下这些特性的根源。

目 录

序言

第一章 半导体的电气性能	1
--------------------	---

第二章 半导体在工业中及日常生活中的应用	19
----------------------------	----

1. 热敏电阻	19
---------------	----

2. 光敏电阻	21
---------------	----

3. 温差电偶	24
---------------	----

4. 冷却器	33
--------------	----

5. 半导体铁磁体(铁氧磁体)	37
-----------------------	----

6. 铁电体和压电体	39
------------------	----

7. 整流器和无线电振荡的放大器(晶体管)	43
-----------------------------	----

8. 光电池	50
--------------	----

第三章 半导体学说的历史及前途	51
-----------------------	----

第一章 半导体的电气性能

从电的观点来看，各种材料是根据它们的导电性能来区分的。至于电流我們可理解为电荷的运动。

当电流通过各种水溶液或溶解的盐类以及許多固体物质时，物质本身的质点也发生轉移。在这些物质中每一个原子或原子团都带有相同的元电荷，这些电荷的数值已經精确地加以测定。1安电流就是在一秒钟內移动 6.25×10^{18} 个元电荷。1安电流在1秒钟內所移动的电量叫做庫倫。所以元电荷等于 $\frac{1}{6.25 \times 10^{18}} = 1.6 \times 10^{-19}$ 庫倫。

当电流通过金属时，物质本身的原子并不随着移动。10安的电流由一种金属流向另一种金属，持續数年也不会改变这两种金属的成份，而在水溶液中，同一电流在同样的時間內能移动好几公斤的物质。我們把金属中的电流看作数值上等于 1.6×10^{-19} 庫倫的电荷的运动，也就是所謂电子的运动；这些电荷在所有的金属中都相同。在光綫和高溫作用下，电子可由金属表面逸出到空气或真空中，在那里，它們的性能比在金属体内更容易研究。事实上各电子总是相同的，并且每一个电子具有 9×10^{-28} 克的质量并带有 1.6×10^{-19} 庫倫的負电荷。

我們知道电子可在金属体内运动，并由一种金属进入另一种金属，它們的运动方向由电力的方向来决定，电子可以离开金属表面等，所有这些情况都导向一个概念，就是电子能在金属原子之間自由运动，象气体分子在空气中运动一样。电子与金属的原子碰撞时，就和它們交换能量。以前人們认为由于这种能量交换，电子的平均能量就与金属原子热运动的平均能量相等，所以在通过电流时，电力所作的功經电子传给金属并使

之发热。这样就解释了通过电流时在导体中的发热现象。

如果在金属中有温度差存在，那末当电子由较热的金属部分转移到较冷的部分时，它们把在较热部分获得的能量传给金属的较冷部分，以这种方法使金属中的温度趋于均一；这种说法解释了金属为什么有很高的导热性。

上述这些还是 30 年前的金属概念。然而它们与实验有深刻的矛盾。

其中最重要的一个矛盾是金属的热容量问题。既然电子获得能量，再将它传给金属原子，并且象气体分子一样，随着金属温度的增加而增加自己的动能，那末当我们加热金属时，势必额外消耗很大一部分热量（这热量等于增加物质原子热运动所消耗的热量之半）来提高电子的能量。但是实验证明，并非如此，金属热容量并不显著超过有同样原子数的绝缘体的热容量。局部修改上述学说是不能消除这个矛盾的。只有根本改变对物质构造、一切基本质点性质（包括电子性质）的基本概念才能消除这个矛盾。

本世纪 20 年代中叶积累了大量的实验资料，它们确切地证明：如果把质点当作一种充满物质的、很小的有限体积，并遵循着大物体、例如石头、炮弹或机械零件所遵循的那些力学定律，则这种对质点的概念是不完全的、片面的。微粒的波动特性很明显，这种特性在其它巨大物体中是不易察觉的。极其微小的质点流（电子流或原子流）在物体中运动时，是不象被掷出来的石头那样，以一定轨道前进，而是发生散射现象，部分反射回来，自相作用，结果在某些方向增强，在另外一些方向则减弱，好象我们所接触到的光或声传播时的波动一样。在波增强的地方电子积聚得很多，而在波相互削弱的地方，则电子很是稀薄。

原子的观念也有了改变：直到1925年人們还把原子作为一种类似太阳系的小型系統，它有一个带正电的很重的原子核，核的周围有許多負电子依一定的軌道旋轉。

本世紀初叶，許多物理学家都把电子想象为一种帶負电的小球，其大小約等于 2×10^{-13} 厘米，它的质量为 9.1×10^{-28} 克，电荷为 1.6×10^{-19} 庫倫。过去人們把电子看作物质最簡單的基本构造部分和简单的电荷凝聚物。那时已认为电子的慣性质量是由于运动的电子如同任何电流一样，在自己周围形成磁場的結果。使电子加速，我們就能增加电流并增强磁場，为此，和加速其它具有一定质量的物体完全一样，必須做适当的功。这样理解时，电子的动能就是当它运动时在周围所产生的磁場能。好象电子的全部性能仅仅限于这一点。

早在1908年，列宁根据辯証唯物論的普遍原則，在自己的著作“唯物論与經驗批判論”中曾指出——不能将电子看作宇宙的最基本元素，其中还蘊藏着无限的多样性。

实验光輝地証实了弗·依·列宁的这个預見。現在我們已經知道，电子除具有电荷及质量外，还具有一定的轉矩和磁矩。我們已經知道有介子存在，它們也具有 1.6×10^{-19} 庫倫的电荷，而它們的质量为电子的200、300、600及900倍，所以它的能量也为电子的200、300、600及900倍；我們知道，在适当的条件下，还能产生正电荷(阳电子)，它們所带的电荷在数值上与电子的相等，但符号相反，它們也具有 9.1×10^{-28} 克的质量。

实验証明，尽管在极稀薄的发光气体中的原子为数极多，但是它們却发出完全相同的光。一个原子的光振盪頻率与同一气体所有其它原子的光振盪頻率极其相似，以致在測量气体所发射的譜綫的波长及頻率时，誤差小于被测值的百万分之一。

量子論对这个熟知的、而又十分奇妙的事实是这样解释的：原子中每个电子仅能处于某些一定的运动状态（所谓的量子态），仅能由一种量子态转变到另一种量子态，同时放射或吸收频率一定的光线。

处于高能态的电子和原子叫做受激电子和受激原子；当电子回复到正常状态时，它放出过剩的能量，这个能量或者以光的形式发射出来，或者传给其它电子。

发出的能量 ϵ 及放射的光线频率 ν 之间存在着正比关系： $\epsilon = h\nu$ ，式中系数 h 在任何情况下都相等，它等于 6.62×10^{-27} 尔格·秒。

系数 h 叫做蒲郎克常数。

最后，还发现了一个不仅为个别原子，而且为一切原子系所具有的重要特性：每个量子态中仅能有一个电子。如果在某个状态中已经有了一个电子，那末无论这个系统怎样巨大，怎样复杂，其中不可能再有另一个电子会处于同样这个量子数。

当我们接触到具有大量电子的原子时，这些电子成层地分布在核的周围。离核最近的 K 层上有两个电子。离核较远的次层 L 上至多有 8 个电子，在 M 层上至多有 18 个电子，依此类推。电子离核愈近，它与核结合也愈紧，使电子离开原子所需的能量也愈大。外层电子与核结合最弱，当其它原子的电子离它们相当近的时候，它们受到的作用最大。这时不同原子的外层电子可以相互结合，将一些原子组成一个系统——分子。这样就产生了化合物。在有些化合物中，部分电子由一个原子跳到另一个原子中，填满其适当的电子层。例如，当锂原子（三个电子中的 2 个位于 K 层，仅一个电子在 L 层上）与氟原子（它共有 9 个电子，其中 7 个位于外层 L 上）相遇时，锂的一

个外层电子跑到氟原子中，在那里形成由 8 个电子組成飽和层 L 。这时鋰原子失去了一个电子，变成鋰的正离子（帶有 3 个正的核电荷和 2 个电子），而氟原子則变成氟的負离子（一个帶有 9 个正电荷的原子核及 10 个电子）。在鋰离子中 K 层是飽和的，在氟离子中， K 层和 L 层都是飽和的。正負离子的靜电吸引形成了氟化鋰分子中的鋰离子和氟离子之間的鍵。

在双原子的氫分子中，我們遇到另一种化学鍵：两个氫原子的电子相互結合着，它們的位置对两个带正电的氫原子核来說是对称的，以“价鍵”將它們結合起来。

构成固体的大量原子（在 1 立方厘米中以 22 位数計）倒底是怎样結合成一个整体的呢？这些电子又是处于那些运动状态的呢？

在固体及液体中，如同在分子中一样，亦有各种各样的鍵。例如，金属中所有原子皆失去其外层电子，而变成正离子。当負电子群在由正离子构成的骨架中运动时，它們結合成一个坚固的固态金属复合体或液态金属复合体。

在类似金刚石等的晶体中，每一个碳原子以其四个外层（ L 层）电子与离其距离相等、角度相同的四个相邻碳原子結合。四个方向中的每一个方向都由一对电子組成鍵，象在氫气中一样。

岩盐（氯化鈉）晶体中，在 M 层上有 1 个电子的鈉原子將該电子交給外层有 7 个电子的氯原子。这样就产生了正的鈉离子和負的氯离子。异性离子的靜电吸收將它們結合成立方晶格；在立方晶格中，正負离子一个个交替地排列着。这便是离子鍵的例子。

还存在着其它形式的鍵。例如，大多数有机物晶体都由那些以坚固的价鍵或离子鍵把若干个原子結合成分子組成的。而

固体中分子間的結合力的比較弱的，这种結合力的性质好象在两个气体分子碰撞时所产生的那样微弱。两个分子的电子并不結合成一个整体，而仅在各个分子的范围内发生位移。这种結合力叫做汪德华(Ван-дер-ваальс)力。

但無論固体或液体中的粒子間的結合力的性质如何，其电子永远遵循下列的量子規律。

当 N 个同样的原子結合成一个物体时，由于它們相互作用的結果，电子的每种量子状态分裂为 N 个近似的、但終究不同的状态(见图 1)。在每一个状态中只能有一个电子。

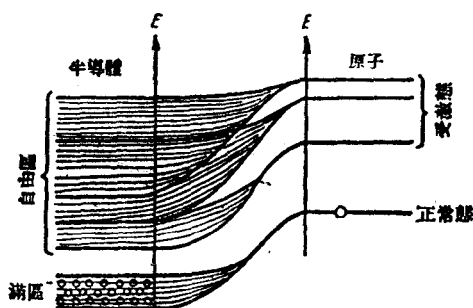


图 1 电子的能态

右边——在絕緣物原子中；左边——在半导体中。

单独地看，每一个电子的速度都相当于一个电流，而总合起来时，在数值上及方向上就相互平衡，以致当沒有电场时，物体中不会呈現任何电流。

在电场中，沿作用于它們之电力方向运动的电子受到加速，而相反方向运动的电子則受到减速。結果順电力方向的电子运动比反方向的电子运动占优势，因而就出現了电流。

考虑到电子仅可能有量子化运动状态，我們应当将加速想象为电子跃迁到一个速度較高的、新的量子状态，将减速想象为电子跃迁到另一个速度較慢的量子状态，而将电流想象为相当于电子由負极向正极运动的状态比沿相反方向运动的状态多。

首先讓我們來研究一下由 N 個原子或分子構成的固體或液體。這些原子具有飽和的外部電子層，即外層全部可能的量子狀態皆為電子占滿着。現在我們具有整個物體的 N 個量子狀態，而不是單獨原子的每一個電子的狀態；但同時物體的電子數卻為一個原子中的 N 倍。所以可以推知，全部量子狀態也為電子所占滿。

根據上述電子的量子性，我們可以斷言，在這類物體中不能產生電流。我們不妨假設在物體中建立了電場。儘管物體中有大量電子存在，儘管每一個電子都受到電場的作用力，但各電子的運動狀態是不變的。要使這個狀態改變，則該狀態必須由另一個狀態來代替，後者應相當於較高或較低的速度或相當於運動方向改變。但是既然每一個可能的量子化運動狀態已為電子所占有，那末電子狀態就不可能改變。無論在產生電場以前或以後，物體中從左至右、從右至左、上上下下、前前後後運動着的電子數量始終相等。換言之，電子所造成的總電流等於零——雖然物體中有大量電子存在，但它還是一種絕緣體。

如果物體由外層電子數未飽和的原子或分子所組成，例如，由以前我們所提到的鋰原子或鈉原子所組成，那就不同了。其中每一個原子的外部電子層上，只有一個電子，而量子狀態卻有兩個。

如果有一固體由 N 個這種原子組成，那末，由於量子狀態分裂的緣故，這固體中將出現 $2N$ 個量子狀態，而電子卻只有 N 個。構成固體的電子必定占有 N 個能量最小的狀態。而其餘 N 個能量較高的狀態仍然空着。在一切被占有的狀態中，左右、前後、上下運動的各種狀態是均等的。所以在這種情況下象以前一樣，沒有電場時便沒有電流。但是這些電子在電場中的表現與上述情況時的表現大不相同了。處於相應于

由負極向正極運動的那些狀態中的電子，在過渡到速度較高的新狀態時不會受到任何阻撓（如果這個新狀態是空的，而這種假想是完全可以實現的，因為物體中尚有大量的各種空的狀態存在）。這種說法僅指那些能量接近於空態能量的電子而言。

這種電子與真空中的自由電子相類似，能够在電場作用下改變自己的運動。

事實上，在固體的原子中電子運動比真空中要複雜得多，因為固體的原子對電子運動有強烈的影響，時而吸引、時而排斥、時而加速、時而減速，仿佛使運動難以計算。然而量子論證明，電子在多原子距離範圍內的運動，平均說來，與這種電荷的自由運動沒有區別，只是其質量有些不同而已。所以我們可以把這些電子看作為善于參加電流移動的自由電子。這種情況發生於金屬中。我們以前所述的那種物質，應將它們的電子看作不能造成電流的束縛電子，而將這些物質看作絕緣體。

我們看到，自由電子及束縛電子的概念在量子論中獲得了迥非尋常的意義。1) 當電子運動狀態接近於未被其它電子所占有的量子狀態時，則這些電子應視為自由電子。2) 當電子運動狀態接近於已為其它電子所占有的量子狀態時，則這些電子應視為束縛電子。這樣一來，滿帶內的一切電子都是不導電的束縛電子。

量子論仿佛得出這樣一個結論，即只可能存在兩種物質類型：帶自由電子的金屬及帶束縛電子的絕緣體。

然而我們還沒有考慮到在個別原子中除帶有最小能量的正常電子狀態外，還可能有較高能量的受激態，並且電子還可能完全脫離自己的原子。形成固體時，不僅每一個正常狀態，而且每一個受激態都分裂為 N 個單獨的狀態。在單個的原子

中，电子由外界获得必需的能量后，可以进入許多受激态中的一个，在絕緣体中也是如此，电子可由完全被电子占滿的正常态滿带轉移到沒有其它电子的受激带。

当进入受激带的这些电子数不多时，这些电子就处于和它們相近的空量子状态中。因而，象我們以前所看到的那样，这些电子可以认为是自由电子，它們能参与导电过程。

促使电子由滿带轉移到“空的”受激态的能量是从那里来的呢？物体原子的热运动可作为物体中經常的能源。如果热运动很強烈，且使电子轉入空态所需的功不大的話，那末經常有一部分电子将因热运动而进入空态，而此物体就变成一个导体。我們称为半导体的正是这些物质。

原子热运动的能量比起解放电子所需的能量愈大，电子向空态轉移的机会也愈多。然而与此同时，部分受激电子将回复到正常态，释放出以前所获得的能量，变为物体原子的热运动。自由电子积聚愈多，回复到正常态的机会也愈多。最后在物体中造成某一平衡状态，那时被热运动轉移到空带的电子数目恰好和回复到正常态的电子数目相等。

在我們所接触到的大多数半导体中，原子热运动的平均能量比将电子移入空带所需的功要小得多。但是热运动很混乱，其中交杂着各种各样的运动形式和速度。如果原子的平均能量不足以解放电子，那末永远有許多极高速的单独原子存在着。这类原子的能量与平均能量相差愈远，出現这能量的情形就愈少。例如，带两倍平均能量的原子数是带平均能量的原子数的 $1/7$ ，带5倍能量的原子数是带平均能量的原子数的 $1/140$ ，带10倍能量的原子数为带平均能量的原子数的 $1/20000$ ，而带20倍能量的原子数乃是带平均能量的原子数的 $1/4 \times 10^8$ 。虽然如此，在上述任何一种情况下，在1立方厘米物体內 10^{23} 个电子中总

有一部分是自由的。

虽然如此，但若使电子迁移入空态所需的功超过平均热能量 100 倍的话，那末带有足够热能的原子数则微乎其微了，本例内每 10^{48} 个原子中这样的原子只有一个。这时，电子向空态迁移就成为极其罕有的机会了。通常，在这种物体中完全没有自由电子，因而它是一个绝缘体。例如，在岩盐的晶体中将电子由束缚态迁移入空态所需的能量是热运动平均能量的 200 倍。所以岩盐是一种绝缘体。

通常我们按现代原子物理学的规定，以电子伏特来测定能量。

电子电荷是一个绝对常数—— 1.6×10^{-19} 库伦。在电场中经过 1 伏的电位差，电子获得的动能等于其电荷乘电位差，即等于 1.6×10^{-19} 焦，或 1.6×10^{-12} 尔格。我们就把这能量叫做 1 个电子伏特。

以这些单位表示的热运动平均能量在室温时，约等于 0.03 电子伏，而在其它温度时，约为 $10^{-4} T$ ，式中 T 为绝对温度，亦即为摄氏温度 t 加上 273.2° ：

$$T = 273.2 + t$$

我们用 U 电子伏表示一个电子迁移入空带所必需的能量。它超过物体原子热运动的平均能量 $U/10^{-4} T$ 倍。随着比值 $U/10^{-4} T$ 的增加，电子处于受激态的概率将迅速减小。

当解放电子所必需的能量 U 不超过 1 电子伏特时，即还不超过平均热能（在寻常温度时为 0.03 电子伏）的 30 倍时，虽然产生的自由电子很少，但是已足够用来形成可以测得出来的电流了。当 U 约为 2 电子伏特时，即当将电子迁移入空态所需的功比原子的平能热能大 60 倍以上时，那末在室温时我们将得到绝缘体，但在摄氏数百度时，该物质中却又显示出导电性。

解放岩盐的电子需要6电子伏特的能量，所以直到熔点温度(摄氏 810°)，岩盐仍不具有导电性的电子。

所以，我們一般所說的半导体与絕緣体的区别不是絕對的，因为一种物质在某些温度时为絕緣体，而在其它較高的温度时，就变成半导体了。而在岩盐的場合下，如果没有电子流，那末在常温下电流由鈉离子来传导，而接近熔点时，氯离子也传导了。

同样很明显，随着温度的升高，每一半导体中的自由电子数也会增加，而当温度降低到絕對零度时，自由电子数也一直降低到零。

因为半导体中自由电子的出現，仅仅是热运动的结果，所以在没有热运动时，自由电子也随之消失。根据这一概念，任何半导体接近絕對零度时都将变成絕緣体。

半导体的这种性能与金属不同：金属中在电力作用下电子能够改变自己的运动，因而能够导电的这种性能与物体原子的热能无关。

热运动不仅能解放半导体的电子，使之产生电流，同时亦为电子的自由运动造成許多障碍，阻止电流通过。

根据量子論，可得出下列关于半导体中电流的概念。

在理想的，正規构造的晶体中，电子几乎能象在真空中一样地运动。

然而应考虑到晶体不是理想的，如偶然的畸变，其它的杂质，最后还有热运动，都会破坏晶格的正規性。許多原子一会儿相互接近，一会儿相互排斥，造成短时的密聚和稀疏。

每一晶格畸变就破坏了电荷的正規交替，造成使电子离开原来方向的局部电场。电子仅能在晶体的未畸变部分自由运动。仅在所謂自由行程的地方电子才积聚能量，加速自己的运