



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

纳米科学与技术

碳电子学基础

薛增泉 著



科学出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

纳米科学与技术

碳电子学基础

薛增泉 著

科学出版社
北京

内 容 简 介

本书以低维碳材料构成的器件为主线,介绍纳米尺度碳材料的结构,以及用其构成的器件,包括碳纳米材料的同素异构体及其原子结构、电子结构;载流子扩散传输、弹道传输的条件和特性;场发射阴极结构和特性,原子分辨像和相干电子发射;碳 60 和巴基葱的结构与特性,以及用其构成的单电子管和电路;石墨烯的发现及其结构和特性,石墨烯的拓扑效应,以及用其构造的三极管和发展前景;碳纳米管的结构和特性,以及用其构成的纳电子器件和电路的特征,双极性三极管和电路特点等。突出器件信息加工过程中的量子效应、相位相干性,以及碳材料构造器件的非费米液体行为和关联电子学等有关问题。在此基础上探讨碳电子学的发展前景,为思考未来电子学的发展提供参考。

本书适合信息、物理、化学、材料等学科的大学本科生、研究生及相关科技人员、教学人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

碳电子学基础/薛增泉著. —北京:科学出版社,2012
(纳米科学与技术/白春礼主编)

ISBN 978-7-03-035289-7

I. 碳… II. 薛… III. 碳-电子学 IV. TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 187567 号

责任编辑:顾英利 刘 冉 / 责任校对:钟 洋
责任印制:钱玉芬 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 8 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2012 年 8 月第一次印刷 印张: 31

字数: 589 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《纳米科学与技术》丛书序

在新兴前沿领域的快速发展过程中,及时整理、归纳、出版前沿科学的系统性专著,一直是发达国家在国家层面上推动科学与技术发展的重要手段,是一个国家保持科学技术的领先权和引领作用的重要策略之一。

科学技术的发展和应用,离不开知识的传播:我们从事科学研究,得到了“数据”(论文),这只是“信息”。将相关的大量信息进行整理、分析,使之形成体系并付诸实践,才变成“知识”。信息和知识如果不能交流,就没有用处,所以需要“传播”(出版),这样才能被更多的人“应用”,被更有效地应用,被更准确地应用,知识才能产生更大的社会效益,国家才能在越来越高的水平上发展。所以,数据→信息→知识→传播→应用→效益→发展,这是科学技术推动社会发展的基本流程。其中,知识的传播,无疑具有桥梁的作用。

整个 20 世纪,我国在及时地编辑、归纳、出版各个领域的科学技术前沿的系列专著方面,已经大大地落后于科技发达国家,其中的原因有许多,我认为更主要的是缘于科学文化的习惯不同:中国科学家不习惯去花时间整理和梳理自己所从事的研究领域的知识,将其变成具有系统性的知识结构。所以,很多学科领域的第一本原创性“教科书”,大都来自欧美国家。当然,真正优秀的著作不仅需要花费时间和精力,更重要的是要有自己的学术思想以及对这个学科领域充分把握和高度概括的学术能力。

纳米科技已经成为 21 世纪前沿科学技术的代表领域之一,其对经济和社会发展所产生的潜在影响,已经成为全球关注的焦点。国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)会刊在 2006 年 12 月评论:“现在的发达国家如果不发展纳米科技,今后必将沦为第三世界发展中国家。”因此,世界各国,尤其是科技强国,都将发展纳米科技作为国家战略。

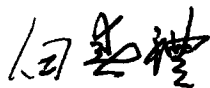
兴起于 20 世纪后期的纳米科技,给我国提供了与科技发达国家同步发展的良好机遇。目前,各国政府都在加大力度出版纳米科技领域的教材、专著以及科普读物。在我国,纳米科技领域尚没有一套能够系统、科学地展现纳米科学技术各个方面前沿进展的系统性专著。因此,国家纳米科学中心与科学出版社共同发起并组织出版《纳米科学与技术》,力求体现本领域出版读物的科学性、准确性和系统性,全面科学地阐述纳米科学技术前沿、基础和应用。本套丛书的出版以高质量、科学性、准确性、系统性、实用性为目标,将涵盖纳米科学技术的所有领域,全面介绍国内外纳米科学技术发展的前沿知识;并长期组织专家撰写、编辑出版下去,为我国

纳米科技各个相关基础学科和技术领域的科技工作者和研究生、本科生等,提供一套重要的参考资料。

这是我们努力实践“科学发展观”思想的一次创新,也是一件利国利民、对国家科学技术发展具有重要意义的大事。感谢科学出版社给我们提供的这个平台,这不仅有助于我国在科研一线工作的高水平科学家逐渐增强归纳、整理和传播知识的主动性(这也是科学研究回馈和服务社会的重要内涵之一),而且有助于培养我国各个领域的人士对前沿科学技术发展的敏感性和兴趣爱好,从而为提高全民科学素养做出贡献。

我谨代表《纳米科学与技术》编委会,感谢为此付出辛勤劳动的作者、编委会委员和出版社的同仁们。

同时希望您,尊贵的读者,如获此书,开卷有益!



中国科学院院长

国家纳米科技指导协调委员会首席科学家

2011年3月于北京

自序

北京大学从1996年开始了有关碳电子学的研究,同时在研究生讲座课程中讨论碳材料的原子结构和电子特性。在总结十几年教学和研究工作的基础上,我们于2010年初在科学出版社出版了《碳电子学》一书,该书自出版以来受到读者的广泛关注。

目前正是与碳有关的电子学迅猛发展的时期,特别是碳家族又增加了一名新成员——石墨烯。2010年,石墨烯的发现者获得了诺贝尔物理学奖,从而激起了人们研究碳电子学的极大热情,有关石墨烯电子器件和电路的论文大量发表,专利数量猛增。同时碳纳米管(CNT)器件、富勒烯单电子管(SET)研究的新进展也被大量报道。当读过一些精彩论文之后,我们深受鼓舞,再重新翻看《碳电子学》一书时,觉得其内容已经在一定程度上落后于学科的发展,有必要在其基础上进行改写和充实。

最初与本书的责任编辑商讨书名,曾想到用“Advanced Carbon Electronics(前进中的碳电子学)”。不妥之处在于无论如何努力,也不可能与当前迅猛的发展形势完全同步。审慎考虑后,决定将本书定名为“Fundamental Carbon Electronics”,即“碳电子学基础”。本书参考了近几年的研究进展,重写石墨烯电子学,充实碳纳米管电子学,增加富勒烯单电子器件和电路。删减了《碳电子学》中不先进和不重要的部分,尽量控制篇幅,突出重点。

在石墨烯的研究过程中,人们加深了对拓扑绝缘体的认识,进而将拓扑绝缘体推向了一种新材料的发现。因此,本书增加了“石墨烯的拓扑效应”一章,这对人们理解二维(2D)体系的原子结构和电子结构,以及进一步探索其应用,是非常有用的。

现今碳电子学的发展势头很猛,人们对其研究热情极高,估计碳电子学将很快成长为一个新的学科和充满美好应用前景的技术领域。碳电子学只是新一代信息科学的一个分支领域,在科学和技术上,给人们以希望,呈现出前所未有的机遇和挑战。单靠一本书全面反映当前有关碳电子学研究的态势是不现实的,《碳电子学基础》主要是总结过去的研究进展,引用了一些当今学者的研究工作,以表达作者的学术思想,书中不当之处甚至错漏在所难免,恳望读者的关注及指正。

特别感谢科学出版社各位编辑,他们在前后两本书的组织安排、编辑加工、出版发行诸多方面做了大量工作。也要感谢《纳米科学技术大系》丛书编委会和《纳

米科学与技术》丛书编委会各位专家, 是他们的鼓励、支持和理解, 保证了《碳电子学》和其续篇《碳电子学基础》的顺利出版。

最后感谢为此书出版做出努力的同仁和关注此书的读者, 祝各位事业有成、健康快乐!

著 者

2012年6月

前 言

20 世纪与 21 世纪之交正是纳米科技迅速崛起和发展之际,纳米科技的兴起应该说是微电子小型化发展趋势促使的。不论是在纳米科技领域,还是在微电子的继续小型化发展前景方面,纳电子学都占有重要位置。在这个世纪之交,北京大学物理电子学的教学、科研队伍进行了系统的纳米电子学基础研究。从 1998 年开始,我们先后承担国家自然科学基金重大项目“纳米电子学基础研究”;国家重大科学研究计划项目“纳米运算器材料的制备、测量、表征”;国家自然科学基金重点项目“高强度相干电子发射源的研究”和国家重大科学研究计划(纳米研究计划)项目“新原理器件:碳纳米管基电子器件”等,至今诸项研究已经结题,成果验收都被评为最高一级的特优或优;后续的研究工作又有了新进展,表明了非常有希望的发展前景。部分成果获得 2005 年北京市自然科学奖一等奖,2007 年国家自然科学奖二等奖。近十年的研究工作突显了低维碳材料可能作为未来电子器件的探索。

本书将在总结过去研究工作的基础上,集中探讨硅电子器件下一代的材料——纳电子器件中有关碳材料的问题,将突出低维碳纳米材料的器件,讨论碳和碳基材料成为未来电子学主流材料的可能性。第一代电子学的核心器件是具有信号放大能力的三极管,作为最基本的非线性元件,配以电阻、电容、电感等线性元件就可以构成任何逻辑电路、运算电路和更复杂的综合集成组件。因此讨论碳电子学,将以低维碳材料构成的器件为主线,介绍纳米尺度碳材料的结构,以及用其构成的器件。有关内容将涉及碳纳米材料的同素异构体及其原子结构、电子结构,载流子扩散传输、弹道传输的条件和特性,场发射阴极结构和特性、原子分辨像和相干电子发射;碳 60(C_{60})和巴基葱的结构与特性以及用其构成的单电子管和电路,石墨烯的发现及其结构和特性以及用其构造的三极管和发展前景,碳纳米管的结构和特性以及用其构成的纳电子器件和电路的特征,双极性三极管和电路特点等。突出器件信息加工过程中的量子效应、相位相干性,以及碳材料构造器件的非费米液体行为和关联电子学等有关问题,在此基础上探讨碳电子学的发展前景。

由于碳是有机分子的主要元素,是生物细胞的基本成分,故在分子电子学和生物电子学中,都涉及碳氢化合物和碳水化合物。关于当今的分子电子学,我们已于 2003 年出版了《分子电子学》一书,因此本书不再涉及有关内容。而生物电子学是正在热门研究的课题,虽然本书不涉及,但将与其有密切关系。三者的综合和发展,将是智能电子学的重要内容,会成为未来智能信息时代的基础。

20 世纪是人类科技发展历史上辉煌的一百年,出现了一系列改变人类社会面

貌的重大发现和发明,其中最重要的是固体电子器件的晶体管,它的基本结构是三极管,能够放大电子信号,是构成集成电路的最基本的非线性元件。以大规模集成电路为基础的微电子技术和产业的发展,推动人类社会进入了信息时代,不仅形成了信息产业,而且成为一种资源,给人类带来了巨大的财富。微电子器件、电路的主流材料是硅(Si),因此人们称现今是硅时代,如同人类经历过的石器时代、铜器时代、铁器时代一样,硅时代有其自己的特征。

微电子还在不断发展,描述其小型化趋势的规律被称为摩尔定律(Moore law):每 18 个月,芯片上的元件数增加 1 倍。这样,元件的尺寸不断地小下去,预计在 21 世纪第二个十年,晶体管将达到它的物理极限,此后尺寸再减小,由于量子效应显著,传统微电子信息加工的理论不再适用,将会产生电子器件发展的跃变,正如由真空电子管到固体晶体管一样,会产生新一代的电子器件,这个电子器件的换代是具有革命性的。电子学发展的过去,表明真空电子器件有其相应的材料、加工技术和真空电子学理论;固体电子器件也有其材料、加工技术和半导体物理。那么微电子下一代的纳电子器件,当然也将会有其特征材料、组装技术和纳电子学理论。由于摩尔定律越来越为更多人接受,人们很早就考虑:新一代电子器件的材料是什么?

这里提出下一代电子器件的主流材料可能是碳(C)材料,与 Si 相比,C 有很多优异特性。由于 C 原子的 2s 和 2p 轨道能量差较小,可耦合杂化成具有特征的新轨道,决定 C 元素有多种同素异构体,在大气环境中稳定存在。C 在地球和宇宙中含量丰富,而且是有机材料和生物材料的基本元素,是构成未来复杂智能电路最有希望的材料,因此未来可能是碳时代!

当器件的尺寸与信号载流子的自由程可比拟时,其输运载流子将保留相位信息,因此与微电子相比,在信号加工过程中,振幅和相位都有更丰富的信息。因为利用了相位信息,也可称纳电子学为相位电子学。纳电子器件的发展,将会有显著的智能特征,必然推动人类社会进入智能信息时代。

20 世纪 40 年代,诺贝尔化学奖获得者奥托·哈恩(Otto Hahn)^①研究电弧放电得到的某些重金属原子在质量上的细微差别,并尝试通过将中子与原子结合来构建更大、更重的原子。在实验过程中,他发现存在完全由碳原子构成的长链。当时关于碳链的成果并未立即受到重视,40 多年以后在相似研究中发现了 C₆₀, C₆₀ 与后来发现的碳纳米管和石墨烯等构成一个系列的低维碳素异构体。

20 世纪 70 年代,出现了天体物理化学和原子团物理新学科,与射电天文学结合,为各种各样的宇宙物质的新发现开辟了途径。星际空间中存在气体组成的巨

^① 参见: Hahn O, Flugge S, Mattauich J. The chemical elements and natural atom-types following the status of isotopes and nuclear research. *Physik Zeits*, 1940, 41: 1-14.

大云团,其产生的无线电信号可用于探测天体中的物质分子,分析中发现存在一些在我们地球实验室里无法合成的未知分子。为模拟宇宙物质,在实验室中采用多种新的方法来产生和检测有限个原子凝聚结构。这些原子以一种奇异的方式聚集在一起,依靠一些新方法,发现了分子的一个新种类——原子团。它的结构和特性处于分子与固体间的过渡区,其结构和特性既不同于原子物理的描述,也不同于凝聚态物理的描述。当时英国天文学家哈里·克罗托(Harry Kroto)和戴维·沃尔顿(David Walton)正在人工合成碳链,该碳链的两端分别以氢或氮结束。他们发现这些物质的光谱图与银河系的巨大气体云团中观察到的某些吸收/发射谱峰一致。他们还对这些气体云团发出的信号进行了探测,这些信号暗示其中存在比地球上所能合成更长的碳链。这些长链碳分子的浓度非常高,远超出人们的想象。科学家们很想知道它们来自哪里,可能的答案是它们来自于恒星中。恒星通过将轻的元素(如氢)聚合成较重的元素以产生能量。恒星可以很小,称为白矮星,也可以很大,称为红巨星,也称碳星,如图1所示^①。太阳是处于白矮星和碳星这两个极端之间的星体。这些长链碳分子最终在冷却的红巨星中发现,这些红巨星已经耗尽最初的氢燃料,现在正“燃烧”氦原子,于是,这种碳被喷射到星际空间,因此在星际中存在大量的碳元素和碳化合物的多种结构。

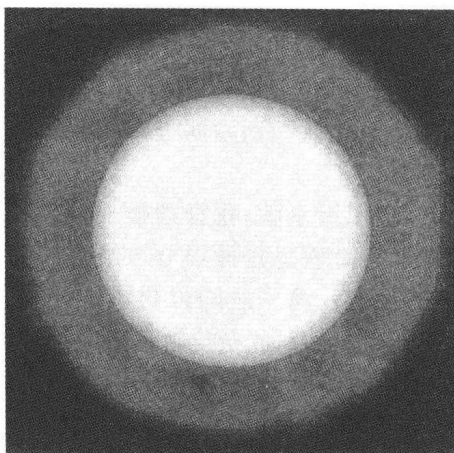


图1 碳星(红巨星)

碳在宇宙演化中起重要作用,它有多种不同形式,并能形成丰富稳定的复合物,从碳原子到元素固态结构、碳基复合物分子和碳化物结构。现在人们的知识是基于观察和实验室分析,至今仍缺乏对空间碳材料的物理和化学结构、特性的理

^① 引自: Porter D, Anderson S. Simulating a pulsating red giant star. <http://www.lcse.umn.edu/research>.

解。在已认识的 118 种星际和恒星分子中,多于 75%是碳基分子,星际尘埃(IS)中最多的成分是碳基。碳在宇宙演化中,从星际介质(ISM)的行星盘和小行星,到形成人类可居住星体的有关过程是研究生命起源的基础。在 ISM 的物理演化中,碳起重要作用,因为它是自由电子的主要供应者,在弥散的 IS 云中,中性的碳射线(C I)和碳离子(C II 和 C IV)是碳传输的通道,这个传输过程加热了 IS 气体,通过光谱能够测量有关体系的密度和温度,发现宇宙中分子气体的运动轨迹,猜测宇宙中存在的分子、固态结构,其中主要成分是碳基材料,多数是多环芳烃(PAH)、碳链分子、碳原子簇和碳固体结构。这些天体物理研究是发现碳的新形态和富勒烯(fullerene)化学的基础^①。

碳在宇宙中是最重要的轻元素,是在星体内部成为物质的基本形式。在质子-质子聚合过程或氢燃烧产生碳氮氧(CNO)循环引起爆炸之后,完成恒星成核过程,在星体内部的质量为 $M \geq 0.5M_{\odot}$,这里 M_{\odot} 为太阳质量。在演变过程中,星球中心的温度和压力上升,直到点燃 He。在这些星球中,中心 He 核收缩的同时,外层物质扩展、冷却。球体变成静观为红色的红巨星。星球演变中的 3α 过程在 ^4He 和 ^{12}C 间搭了个桥。多数 ^{12}C 以共振形式存在,有一些非共振(低效率)的演化为 ^{16}O ,这涉及宇宙内一些元素生成的过程,其中碳起重要作用^②。类似红巨星演化过程的重要贡献是产生宇宙中的星际介质,这个过程的细节描述发展了星际介质化学,研究红巨星元素 C 和 O 从核到表面的传输过程,最后由富 O 或富 C 分子和难熔的固体形成延伸很宽范围的包裹层,其中 C/O 有特殊的比例关系,与化学和物理条件有关。至今人类也只是认识到周期表中一些较轻元素的演化过程,很多较重元素仍然是有待探索的谜。

在人类生活的地球环境中,元素碳、化合物碳、有机物中的碳和生物中的碳也是普遍的、稳定的、丰富的。因此碳是自然界分布最普遍的元素之一,也是构成地球上一切生命体最重要的元素。原子之间以化学键相连,碳原子间不仅能够以 sp^3 杂化轨道形成单键,还能以 sp^2 及 sp 杂化轨道形成稳定的双键和叁键。一个碳原子可以通过单键、双键或叁键方式与其他原子连接。因此,除了自然界存在多种同素异构体的碳材料外,科学家们通过实验还合成了许许多多结构和性质完全不同的与碳有关的材料。有关碳的异构体除人们熟悉的金刚石、石墨之外,近些年还发现了以 C_{60} 为代表的富勒烯(包括多层的同心球,称为巴基葱)、碳纳米管、石墨烯以及纳米线、纳米粉体等。以碳元素为主构成的有机高分子材料,包括塑料、橡胶和纤维等,已发展成为材料学三个主要学科方向之一。而以碳元素为主,通过不同的结构、组合,也形成了一个独特的无机非金属材料世界。这些新型碳材料的特

^① 参见: Hahn O, Flugge S, Mattauch J. The chemical elements and natural atom-types following the status of isotopes-and nuclear research. Physik Zeits, 1940, 41: 1-14.

性几乎可涵盖地球上所有物质的性质,甚至相对立的两种性质,如最硬-极软、全吸光-全透光、绝缘体-半导体-良导体、绝热-良导热、高温铁磁体、高临界温度的超导体等。碳原子能以不同的方式与多种原子连接,形成小到几个原子、大到上百万个原子的分子。这种独特的多样性奠定了生命的基础,它也是与人类生命密切相关的学科——有机化学的核心。碳是地球生活的核心元素,地球上几乎所有的有机物质都含有碳元素。碳原子可形成长链条和链环,将氢和氧等原子缠绕固定在一起,形成双原子化学分子,又称为双重束缚。含碳-碳双键的链状有机分子称为烯烃,可将分子部件重新组合成其他性能更优异的物质。通过换位反应,双原子分子可以在碳原子的作用下断裂,从而使原来的原子改变位置,换位过程需要加入某些特殊化学催化剂。这就是烯烃复分解反应,该反应借助特殊的催化剂,使碳原子旧的结构不断被打破,新的结构不断形成:各种元素换位,重新组合,从而形成新的有机物,呈现碳化学的复杂性和多样性。

碳元素广泛存在于茫茫的宇宙间和无垠的地球上,碳在生命分子演化中也是关键元素。碳是地球上一切生物有机体的骨架元素,也可以说没有碳元素就没有生命。在地球生物体中,糖、脂肪、蛋白质、核酸是最基本的物质,它们的分子中都含有碳元素。碳元素大约占生物体干重的 49%,是有机化合物的骨架,所以碳是地球生命的基本元素。碳在无机自然环境中以 CO_2 和碳酸盐(石灰岩、珊瑚礁)的形式存在。地球表面的碳循环是生命存在的重要环节,碳在无机环境与生物群落间是以 CO_2 的形式进行循环的。图 2 表明了地球生命过程中的碳循环。大气中的 CO_2 进入生物群落,主要依赖于绿色植物的光合作用,使 CO_2 中的碳变成有机物中的碳,再通过食物链进入动物和其他生物体中,因此碳循环是地球生命体系的基础。一些微生物也能把 CO_2 合成为有机物。还有一部分生物遗体没有被分解,转变成为地下的石油和煤,一经开采运到地面用作燃料,在燃烧过程中产生 CO_2 再返回碳循环。碳的特有物性和多种多样的形态随人类文明的进步而逐渐被发现、认识和开发利用。差不多所有对生命具有重要意义的分子骨架成分都是由它构成的,例如 DNA、氨基酸、蛋白质、生物酶、细胞、细菌、病毒等。碳的独特性质源自它能与自身形成稳定的键,而大多数其他元素更倾向于跟不同的元素形成化学键。令人吃惊的是,碳与少数几种元素(如氢、氧、氮)形成的化合物比所有其他大约 100 多种元素形成的化合物的总和还要多。智能信息时代的主流材料,不仅需要碳元素构成的材料,更有意义的可能是与生命兼容的生物活性材料。人类的研究将从简单的元素结构,到复杂的结构,再到深入活体的生物材料,这个发展路径是以碳骨架为基础的。

碳的相对原子质量为 12,在自然界中碳还有相对原子质量为 14 的同位素,它

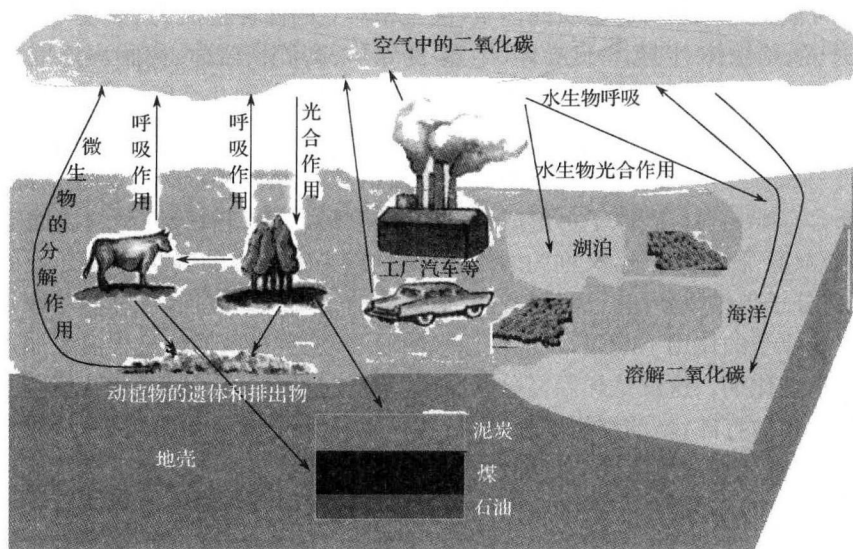


图2 地球生命过程中的碳循环

与宇宙射线有关^①。宇宙空间一直在不断地向地球发射各种各样的宇宙射线。其中一种为中子射线,这些中子和大气中的氮(¹⁵N)原子核发生碰撞,打出一个质子,同时产生¹⁴C,它是碳原子的放射性同位素。结果,在地球的大气中,¹⁴C的含量不断增加。但是,放射性同位素是有一定寿命的,它会发生放射性衰变。¹⁴C的半衰期是5568年。就是说,每隔5568年,¹⁴C的含量就要减少一半。这样,在地球表面,¹⁴C不断地产生,同时又不断地消亡,结果使大气中的放射性¹⁴C浓度达到一定的平衡值。地球上的植物都要摄取以二氧化碳形式存在的碳元素,才得以不断地同化、生长、繁殖下去,而地球上的动物又是直接或间接以食取植物为生的。因此,地球上生长着的动植物体内所含的碳元素中,放射性¹⁴C的浓度必然也会达到一定的平衡值。通过测定知道地球上的生物活体中所含的¹⁴C浓度为16 ppm^②,是一个固定值,即每吨普通碳元素中含有的¹⁴C为16 g。

当地球上动植物体死亡以后,体内¹⁴C含量将不再增加,但衰减仍在进行,所以浓度就要发生变化。这样,当树木死亡后,它与外界的交换完全隔绝,不再摄取CO₂,也就不会再增加新的¹⁴C。从这时起,木材中原先含有的¹⁴C的浓度将要按照5568年的半衰期一半一半地不断减少下去。因此,对于出土的远古时代的木材样品,只要测定出¹⁴C的浓度,就能断定这些木材样品是多少年以前生长或者制造的。因此通过测定¹⁴C的浓度就可以进行多种多样的年代测定工作,如远古时代

① 参见:<http://www.univs.cn/newweb/2007-04-02>; <http://sucai.dabaoku.com>。

② ppm为非法定用法,1 ppm=1×10⁻⁶。为遵从学科及读者习惯,本书仍沿用这一用法,特此说明。

的木材、人体遗骨、动植物化石或煤炭的年代测定等。此外,古代发生的巨大地质变化,例如火山爆发、大地震或山洪暴发等自然现象究竟是在什么时代发生的?只需要找到当时被埋没的动植物等遗骸,通过类似的测定,就可以获得准确的结论。由于 ^{14}C 的半衰期是 5568 年,所以,上述方法适合于测定三万年以前到五百年以前的这一段时间。 ^{14}C 时钟对于测定人类历史的年代以及碳在自然界物质循环过程中的变化有重要意义。因为碳是温室气体二氧化碳的两种组成元素之一,而二氧化碳在大气中含量的变化是地球气候发生改变的关键。研究自然界中碳的循环规律是揭示地球环境变化的重要方法。碳又是生命物质的最基本元素之一,生命活动是碳元素在自然界进行循环的最重要的影响因素。科学家们可以通过研究岩石中碳的同位素组成比例的变化来了解地质时期生命活动与碳循环的关系,从而揭示大气和海洋环境的变化过程。

从 20 世纪 80 年代开始,世界上一批先驱者提出研究分子电子学,以有机分子及其复合物为主要材料,其特点是不仅在分子尺度上构造、组装光电功能器件、电路,而且有自检测、自修复的能力。21 世纪伊始,在出现纳电子学的同时,生物电子学也得以发展,开始研究动物脑细胞信息加工的特征。人们预计分子电子学和生物电子学可能是未来智能信息时代的重要基础。本书将从碳电子学的概念出发,逐步深入讨论有关问题。

目 录

《纳米科学与技术》丛书序

自序

前言

第 0 章 绪论	1
0.1 科技发展的机遇	1
0.2 纳电子学	5
0.2.1 三代电子器件	6
0.2.2 纳电子器件的主要特征	7
0.2.3 放大电信号的基本元件	8
0.2.4 从碳切入研究纳电子器件	9
0.3 摩尔定律之外.....	11
0.3.1 摩尔定律.....	12
0.3.2 量子调控.....	14
0.4 NBIC 会聚技术	16
0.5 碳时代.....	17
参考文献	19
第 1 章 碳元素材料	20
1.1 碳的轨道杂化.....	20
1.2 碳的异构体.....	23
1.2.1 石墨与金刚石	24
1.2.2 碳纤维	25
1.2.3 富勒烯	25
1.2.4 碳纳米管.....	27
1.2.5 石墨烯	28
参考文献	29
第 2 章 C₆₀ 与巴基葱	30
2.1 C ₆₀	30
2.2 巴基葱.....	32
2.2.1 巴基葱的制备	32
2.2.2 巴基葱的电学特性	33

2.3	富勒烯场效应三极管物理	36
2.3.1	分子的隧穿传输	38
2.3.2	分子通道的传输速率	40
2.3.3	压缩 C_{60} 时的能级排斥	42
2.3.4	机电单分子三极管	47
2.4	C_{60} 单电子管	49
2.5	单电子管电路	53
2.6	C_{70} 复合物三极管与电路	55
2.6.1	[70]PCBM 三极管的电荷传输	55
2.6.2	基于[70]PCBM 三极管的逻辑电路	59
2.7	碳纳米管填充富勒烯	60
2.8	C_{60} /并五苯倒相器	63
2.8.1	底接触双极性 OTFT	65
2.8.2	C_{60} /苯异质结构的底接触倒相器	68
2.9	C_{60} 复合物三极管	69
2.9.1	C_{60} -三聚氰胺功能材料制备	70
2.9.2	三聚氰胺膜的结构和介电特性	71
2.9.3	小分子三极管的传输和输出特性	72
	参考文献	74
第3章	碳纳米管制造	75
3.1	电弧放电法	75
3.2	激光蒸发法	76
3.3	化学气相沉积法	77
	参考文献	79
第4章	碳纳米管的原子结构	80
4.1	碳纳米管结构的分类	80
4.1.1	手性矢量 C_h	80
4.1.2	平移矢量 T	81
4.1.3	对称矢量 R	82
4.2	单胞与布里渊区	83
	参考文献	84
第5章	碳纳米管的电子结构	85
5.1	单电子色散关系	85
5.1.1	能量色散关系的区域重叠	85
5.1.2	扶手椅型管和锯齿型管的能散	87

5.1.3 手性纳米管的色散	89
5.2 态密度和能隙	90
5.3 派尔斯相变	92
参考文献	93
第6章 理想的纳电子材料	94
6.1 碳纳米管的电学特性	95
6.1.1 场发射器件	96
6.1.2 纳电子器件	97
6.2 未来的主流电子材料	98
6.3 碳管的电导率和迁移率	100
参考文献	103
第7章 碳纳米管的传输特性	104
7.1 在一维体系中的电子输运	104
7.2 三种传输特征	106
7.3 弹道导体	108
7.4 经典输运	109
7.5 局域化	110
7.6 普适电导涨落	111
7.7 碳纳米管的电子传输	113
7.8 碳纳米管电导与温度的关系	116
参考文献	119
第8章 碳纳米管中电子的弹道输运	121
8.1 纳米尺度弹道输运的概念	121
8.2 共振传输	127
8.3 碳纳米管的弹道输运	128
8.4 碳纳米管超导特性	133
8.5 尺寸对超导特性的影响	139
8.5.1 1D电子体系中的相变	139
8.5.2 Luttinger 液体崩溃	140
8.5.3 超出 Luttinger 模型	141
8.6 单壁碳纳米管的超导	142
8.7 碳纳米管的超导近邻效应	145
8.8 单壁碳纳米管的超流	149
8.9 多壁碳纳米管的超流	153
参考文献	156