



Physics of Solar Cells

From Basic Principles to Advanced Concepts

太阳电池

——从新概念到新技术



〔德〕彼得·乌夫尔（Peter Würfel） 著
陈红雨 郭长娟 李核 匡代彬 译

2 原著第二版
EDITION



化学工业出版社

Physics of Solar Cells

From Basic Principles to Advanced Concepts

太阳电池

——从新概念到新技术



[德] 彼得·乌夫尔 (Peter Würfel) 著

陈红雨 郭长娟 李核 匡代彬 译



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是原著第二版,基于读者对第一版的关注,本版内容进行了全面更新和扩展,包含了太阳能转换机制的最新知识。书中详细介绍了太阳能电池功能的各个方面,如黑体辐射与太阳光谱,半导体及其电子与空穴,热辐射-化学能的转换,化学能-电能的转换,太阳能电池基本结构(包括硅太阳能电池、薄膜太阳能电池、染料敏化太阳能电池等),太阳能电池能量转换的限制因素,提高太阳能电池效率要考虑的所有问题等。重点放在热力学方法上,它独立于太阳能电池结构存在,这有利于对太阳热辐射能转换成电能的转换效率限制给出全面的判断,也可以说明现有太阳能电池的发展潜能及限制。

这是一本非常好的研究参考书和教科书,它既是从事太阳能电池研究开发、生产制造及使用运行的必备基础书,又适合相关专业研究生及高年级本科生作为教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能电池——从新概念到新技术/[德]乌夫尔(Würfel, P.)著;陈红雨等译. —北京:化学工业出版社, 2013.5

书名原文: Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts

ISBN 978-7-122-17200-6

I. ①太… II. ①乌…②陈… III. ①太阳能电池-基本知识 IV. ①TM914.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第088292号

Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts, Second edition/by Peter Würfel

ISBN 978-3-527-40857-6

Originally published in the English Language by WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Boschstrabe 12, D-69469 Weinheim, Federal Republic of Germany, under the title "Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts". Copyright© 2009 by WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

本书中文简体字版由 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA 授权化学工业出版社独家出版发行。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分,违者必究。

北京市版权局著作权合同登记号:01-2010-8022

责任编辑:成荣霞

文字编辑:刘志茹

责任校对:战河红

装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张13½ 字数245千字 2013年11月北京第2版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686)

售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:49.00元

版权所有 违者必究

前言

» FOREWORD

人类生活需要能量。我们除了从食物中获得能量用以维持身体及其基本机能外 (100W), 平均还需要较食物提供的 30 多倍能量来满足我们舒适的生活。电能是最有用的能源之一, 它几乎可以用于任何用途。地球上所有的生命都是基于太阳能通过藻类植物的光合作用而创造的。人类可以用太阳电池通过光电能量转换来生产电能, 这是人类历史上首次无需借助植物, 而直接利用太阳能就可以制造出高品质的能量。由于它的可持续性, 也就是说, 长期能源的提供都必须是基于太阳能的, 所以未来光电能转换将是必不可少的一种生产能源的方式。

本书对太阳电池的基本原理进行了深入阐述。在对原理的讨论中对现有技术和将来的发展进行了通俗的描述。太阳电池中能量的转换包括两个步骤。第一步是吸收太阳辐射, 即产生化学能。这个过程发生在每个半导体中。第二步是通过产生电流和电压转换成电能。这个过程就需要适当的结构和力去驱动由于入射光产生的电子和空穴以电流的方式通过太阳电池。这种由于特殊结构和力引起的电荷定向传输将在本书中详细介绍。在这个过程中可以看出存在于暗区 pn 结中的电场 (通常被认为是太阳电池工作的先决条件), 实际上是一个附加现象, 是由于其他原因所必需的结构, 并不是太阳电池的基本特性。太阳电池的结构可以由具有半导体特性的吸收体来描述, 其内发生太阳能转换成化学能且包含两个半渗透膜, 一个位于末端传输电子阻碍空穴, 另一个位于另一末端传输空穴阻碍电子。此书力图以一种便于理解的方式全面阐述太阳电池的基本物理原理。除了极少数的例外, 所有的物理关系都会被推导且以实例说明, 以便于没有物理背景的读者理解本书。

此书将重点放在热力学方法上, 它独立于太阳电池结构的存在。这有利于对太阳热辐射能转换成电能的转换效率限制给出全面的判断, 也可以说明现有太阳电池的发展潜能及限制。我们将依循 W. Shockley 和 H. J. Queisser 开辟的路线进行说明^①。

本书是综合了一系列关于太阳电池物理学的讲座而成的。非常感谢那些给我提出建议和指出错误的学生。这里所展现的素材与一般依赖于电场提供驱动力的

① W. Shockley, H. J. Queisser, *J. Appl. Phys.* 32, (1961), 510.

太阳电池的处理不同，它是多年来与我的老师 W. Ruppel 合作研究的成果。

从某种程度上来说，本书相较于一般的半导体物理学和太阳电池物理学更为严谨。最明显的就是同样的物理量将用同样的物理符号表示，如：流量密度将用 j 表示，它所传输的量用不同的下标来区分， j_0 表示电荷流的密度， j_e 表示电子流的密度。根据此原则，所有微粒的浓度都用 n 表示， n_e 表示电子的浓度， n_h 表示空穴的浓度， n_γ 表示光子的浓度。希望习惯于用 n 和 p 表示电子和空穴浓度的读者不会觉得很难适应这种更合理的表示方法。

尽管油、气储量只能够维持不足一百年，但是按照现行做法，促使我们从消耗储备能源转向使用可再生能源，并不在于消耗储备能源的本身。能源的枯竭并不会困扰我们，因为这将是我们有生之年看不到的事情。但假设我们能活到 500 岁，那我们就不得不去面对现在这样消耗能源的后果了。促使我们转变为使用可再生能源的应该是使用化石燃料和核能产生的副产物对环境产生的灾难性后果。因为这是使用太阳电池的最实际动机，本书将从讨论我们现有能源经济引起的后果和对气候的影响开始展开。因为太阳能经济被证明可以消除上述问题，所以我们应大力发展和完善光电技术，此书将为此提供理论依据。

Peter Würfel

符号列表

$h, \hbar = h/(2\pi)$	普朗克常数	$\text{eV} \cdot \text{s}$
$\hbar\omega$	光子能量	eV
$a(\hbar\omega)$	吸收率	
$r(\hbar\omega)$	反射率	
$t(\hbar\omega)$	传输率	
$\epsilon(\hbar\omega) = a(\hbar\omega)$	发射率	
$\alpha(\hbar\omega)$	吸收系数	cm^{-1}
k	玻耳兹曼常数	$\text{eV} \cdot \text{K}^{-1}$
σ	斯蒂芬-玻耳兹曼常数	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$
T	温度	K
n_j	j 粒子的浓度	cm^{-3}
e	电子	
h	空穴	
γ	光子	
Γ	声子	
n_e, n_h	电子浓度, 空穴浓度	cm^{-3}
n_i	电子和空穴的本征浓度	cm^{-3}
N_C, N_V	导带、价带中的有效态密度	cm^{-3}
ϵ_e, ϵ_h	电子、空穴的能量	eV
ϵ_C	导带最低电子能量	eV
ϵ_V	价带最高电子能量	eV
μ_j	j 粒子的化学势	eV
η_j	j 粒子的电化学势	eV
χ_e	电子亲和势	eV
φ	电势	V
e	元电荷	$\text{A} \cdot \text{s}$
ϵ_0	真空介电常数	$\text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
ϵ	相对介电常数	
V	电压 $= [\eta_e(x_1) - \eta_e(x_2)]/e$	V
ϵ_{FC}	导带中电子分布的费米能级	eV
ϵ_{FV}	价带中电子分布的费米能级	eV
m_e^*, m_h^*	电子、空穴的有效质量	g

b_e, b_h	电子、空穴的迁移率	$\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
D_e, D_h	电子、空穴的扩散系数	$\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
τ_e, τ_h	电子、空穴的复合寿命	s
R_e, R_h	电子、空穴的复合率	$\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
G_e, G_h	电子、空穴的产生率	$\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
σ_e, σ_h	杂质俘获电子、空穴的横截面	cm^2
j_j	j 粒子流量密度	$\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
j_Q	电荷电流密度	$\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$

目 录

➤ CONTENTS

1 能源经济问题 1/

1.1 能源经济	2
1.2 化石能源最大储量的估算	4
1.3 温室效应	6
1.3.1 燃烧	6
1.3.2 地球温度	6
习题	9

2 光子 11/

2.1 黑体辐射	12
2.1.1 空腔光子密度 n_γ (普朗克辐射定律)	12
2.1.2 通过面积 dA 进入立体角 $d\Omega$ 的能量电流	16
2.1.3 从球面进入立体角 $d\Omega$ 的辐射	19
2.1.4 从表面单元进入半球的辐射 (斯蒂芬-玻耳兹曼辐射定律)	19
2.2 非黑体辐射的基尔霍夫定律	21
2.2.1 半导体吸收	23
2.3 太阳光谱	23
2.3.1 大气质量	25
2.4 太阳辐射强度	26
2.4.1 阿贝正弦条件	27
2.4.2 几何光学	28
2.4.3 正弦条件下的辐射强度	29
2.5 太阳能转化的最大效率	31
习题	36

3 半导体 37/

3.1 半导体中的电子	39
3.1.1 电子的排布函数	39
3.1.2 电子的状态密度 D_c	40

3.1.3 电子的密度	44
3.2 空穴	45
3.3 掺杂	48
3.4 准费米分布	52
3.4.1 费米能级及电化学电位	53
3.4.2 功函	57
3.5 电子和空穴对的产生	58
3.5.1 光子吸收	59
3.5.2 电子-空穴对的发生	62
3.6 电子与空穴的复合	64
3.6.1 辐射复合, 光子发射	64
3.6.2 非辐射复合	67
3.6.3 寿命	75
3.7 半导体发光	77
3.7.1 跃迁率与吸收系数	77
习题	81

4 热辐射转化为化学能 83/

4.1 化学能产生的最大效率	86
习题	91

5 化学能转化为电能 93/

5.1 电子及空穴传输	94
5.1.1 场电流	94
5.1.2 扩散电流	96
5.1.3 总电荷电流	97
5.2 电子和空穴的分离	99
5.3 少数载流子的扩散距离	101
5.4 介电弛豫	102
5.5 双极性扩散	103
5.6 丹倍效应	104
5.7 数学描述	107
习题	107

6 太阳能电池的基本结构 109/

6.1 化学太阳能电池	110
6.2 太阳能电池基本原理	114

6.3	染料敏化太阳电池	115
6.4	pn 结	116
6.4.1	暗区中电子在 pn 结中的电化学平衡	116
6.4.2	pn 结电位分布	117
6.4.3	pn 结的伏安 (电流-电压) 特性	120
6.5	pn 结掺杂复合的二极管模型	125
6.6	异质结	127
6.7	半导体-金属接触	129
6.7.1	肖特基接触	131
6.7.2	金属-绝缘体-半导体接触	131
6.8	电场在太阳电池中的作用	132
6.9	有机太阳电池	135
6.9.1	激子	135
6.9.2	有机太阳电池结构	138
6.10	发光二极管	141
	习题	142

7 太阳电池能量转换限制

145/

7.1	太阳电池最大效率	146
7.2	太阳电池效率与能隙的函数	149
7.3	最理想的硅太阳电池	150
7.3.1	光捕捉	151
7.4	薄膜太阳电池	155
7.4.1	太阳电池的最小厚度	155
7.5	等效电路	157
7.6	开路电压对温度的依赖	158
7.7	效率对强度的依赖	158
7.8	单个能量转换过程的效率	159
	习题	161

8 提高太阳电池效率的方法

163/

8.1	串接电池	164
8.1.1	串接电池的电连接	167
8.2	聚光太阳电池	168
8.3	光伏能量转换	169
8.4	碰撞电离	171
8.4.1	碰撞电离热电子	173

8.4.2 热电子与空穴的能量转换	173
8.5 三水平体系中的两步激发	176
8.5.1 杂质光伏效应	176
8.5.2 光子的上转换与下转换	180
习题	183

前景展望	184/
-------------	------

习题答案	187/
-------------	------

附录	202/
-----------	------

参考文献	204/
-------------	------

索引	205/
-----------	------

1

能源经济问题

Chapter 1

几乎所有国家（特别是发达国家）的能源经济都是基于储备能源的利用，主要是以煤、油、气形式存在的化石能源以及以铀的同位素 ^{235}U 形式存在的核能。使用这些储藏的能源来满足我们的能源需求会导致两个问题。一是这种能源总有一天被耗尽。在这种能源耗尽前，我们必须考虑能源耗尽后如何继续生活，所以我们必须开发替代能源。此外，随着能源的消耗还伴随着一些不良的副效应。长久埋藏于地下的物质得到释放后会通过一些途径侵入大气、水和食物中。虽然到目前为止，这些弊端还不是很明显，但它会对我们子孙后代造成影响。这一章中将精确评估化石能源的储量，不仅包括化石能源载体的部分，也包括大气中支持它们燃烧的氧气。另外，还要研究温室效应的原因，它实际上是燃烧化石燃料不可避免的后果。

1.1 能源经济

储存在化石能源载体中的化学能的数量是以能量单位来计算，实际上有些单位偏大，有些单位偏小。最基本的单位是焦耳（J），它是一个很小的单位，代表给 1g 水加热升高 0.25°C 所需的能量或者功率为 1kW 的吹风机 1ms 所消耗的能量。更实用的单位是千瓦时（ $\text{kW}\cdot\text{h}$ ），相当于 $3.6\times 10^6\text{J}$ 。100g 巧克力所含能量就是 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 。千瓦时（ $\text{kW}\cdot\text{h}$ ）是由功率单位瓦特延伸而来的，表示的是单位时间的能量。它转变为能量等于功率乘以时间。这导致在非科学性的出版物中存在大量的错误，例如把 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 作为功率的单位，因为很多人错误地认为千瓦是能量最基本的单位。化石燃料的能量常用油的桶数或煤的吨（立方）数来表示（t coal equ.）。

以下为单位转换关系式：

$$1\text{kW}\cdot\text{h}=3.6\times 10^6\text{J}=1\text{kW}\cdot\text{h}$$

$$1\text{t coal equ.}=29\times 10^9\text{J}=8200\text{kW}\cdot\text{h}$$

$$1\text{kg oil}=1.4\text{kg coal equ.}=12.0\text{kW}\cdot\text{h}$$

$$1\text{m}^3\text{ gas}=1.1\text{kg coal equ.}=9.0\text{kW}\cdot\text{h}$$

$$1\text{barrel oil}=195\text{kg coal equ.}=670\text{kW}\cdot\text{h}$$

单位时间消耗的化学能是储存能源释放出来的能量流（功率）。因而，如果每年消耗一吨煤的话，则总计一年的能量流平均值为

$$1\text{t/a 标准煤}=8200\text{kW}\cdot\text{h/a}=0.94\text{kW}$$

现在来看德国这个人口密度较大的工业化国家。表 1.1 说明了 2002 年德国八千两百五十万人口的能源消耗情况。其中每年消耗的电能为

表 1.1 2002 年德国主要能源的消耗

能源类型	消耗量/(10^6 t coal equ./a)	人均消耗量/(kW/人)
油(Oil)	185	2.24
气(Gas)	107	1.30
煤(Coal)	122	1.48
核能(Nuclear energy)	62	0.75
其他	17	0.21
合计	494	5.98

$$570\text{TWh/a}=65\text{GW}\longrightarrow 0.79\text{kW/人}$$

德国人均消耗能源总量 5.98kW, 这相比于人类从食物中摄取的能量流 $2000\text{kcal/d}=100\text{W}=0.1\text{kW}$ (代表维持生命的最低需求) 是很高的了。

表 1.2 所示为 2002 年世界上 60 亿人口消耗的主要能源的情况。这些消耗的能源是由可利用的能源储备 (除了水力发电、风能和生物质) 提供的。当前的能源储备量如表 1.3 所示。这些能源总量是以当前的价格和技术能经济开采的储量评估而得。实际储存量大概是其 10 倍, 约 $1.0\times 10^{13}\text{t}$ 标准煤。

表 1.2 2002 年世界主要能源的消耗

能源类型	消耗量/(10^9 t coal equ./a)	人均消耗量/(kW/人)
油(Oil)	4.93	0.82
气(Gas)	3.19	0.53
煤(Coal)	3.36	0.56
核能(Nuclear energy)	0.86	0.14
其他	0.86	0.14
合计	13.2	2.19

表 1.3 世界上主要能源的储存量

能源类型	储量/ 10^9 t 标准煤
油(Oil)	210
气(Gas)	170
煤(Coal)	660
合计	1040

全球每年消耗的能源相当于 $1.32\times 10^{10}\text{t}$ 标准煤, 与来自太阳辐射到地球的能量相比显得很少, 辐射向地球的能量为:

$$1.7\times 10^{17}\text{W}=1.5\times 10^{18}\text{kW}\cdot\text{h/a}=1.8\times 10^{14}\text{t 标准煤/a}$$

然而, 在欧洲人口密集的德国, 如果仅仅靠使用光合作用将太阳能转化为可利用的能源的话, 需求与可供应的能量就不平衡了。德国以面积 $0.36\times 10^6\text{km}^2$ 计算, 太阳辐射的平均能量约为 $3.6\times 10^{14}\text{kW}\cdot\text{h/a}=4.3\times 10^{10}\text{t/a}$ 标准煤。而平均到所有植物的光合作用, 仅有约 1% 的转化效率, 以此产生的能量

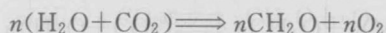
大约为 $4.00 \times 10^8 \text{ t}$ 标准煤/a。这个能量并不能满足德国基本的能源需求 ($4.94 \times 10^8 \text{ t/a}$ 标准煤)。更重要的是, 德国的所有领土面积上的植物通过光合作用产生的氧气还不能满足天然气、油和煤燃烧的需要。这还没考虑在此过程中产生的生物质不是储存仅仅腐烂而还需要消耗光合作用产生的氧。这个评估还表明只有达到比光合作用更高的太阳能转化效率, 太阳能才能满足德国本土的能源需求。事实上在可预见的未来, 只有风可以持续地提供氧气, 因为它可以把氧气从低消耗区带来。然而, 在氧气用尽前还要清醒地意识到燃烧导致的二氧化碳增加。

1.2 化石能源最大储量的估算

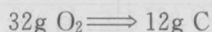
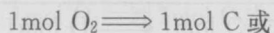
在对化石能源最大储量进行评估^①前, 我们假定存在有机生命之前地球上既没有游离碳也没有游离氧。地球演变历史的过程中碳和氧在高温环境迅速反应, 碳和氧彼此可以形成二氧化碳, 也可以与其他许多元素形成碳化物和氧化物, 这是我们假设的一个有力证据。今天在地球表面仍有单质金属存在, 即便是少量, 这也可以认为没有游离碳和游离氧与它们反应。

而现在, 在大气中存在游离氧只能认为是在晚些时候通过光合作用产生的。根据当今大气中氧的含量去估算光合作用的产物中碳的储存量。

光合作用中, 水和二氧化碳结合形成碳水化合物, 反应方程如下:



光合作用一种典型的产物就是葡萄糖: $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \equiv 6\text{CH}_2\text{O}$ 。对于这种化合物及多数其他碳水化合物而言, 通过光合作用产生氧与在碳水化合物中储存碳的比率为:



因而储存的碳的质量 m_{C} 可以依据游离氧的质量 m_{O_2} 得出:

$$m_{\text{C}} = \frac{12}{32} m_{\text{O}_2}$$

通过光合作用产生的氧大部分存在于大气中, 只有较小的一部分是溶到海洋中的水里。大气中的氧所占比例足以作为我们估算的基础。

根据环绕在我们星球周围的空气所导致的地球表层的压力为 $p_{\text{E}} = 1\text{bar} = 10\text{N/cm}^2$, 可以依据关系式 $m_{\text{空气}} \times g = p_{\text{E}} \times \text{面积}$, 计算出空气的质量:

$$m_{\text{空气}} / \text{面积} = p_{\text{E}} / g = \frac{10\text{N/cm}^2}{10\text{m/s}^2} = 1\text{kg/cm}^2$$

① G. Falk, W. Ruppel, *Energie und Entropie*, Springer-Verlag, Berlin 1976.

再乘以地球的面积，则可以给出空气的总质量

$$m_{\text{空气}} = 1\text{kg/cm}^2 \times 4\pi R_{\text{地球}}^2 = 5 \times 10^{15} \text{ t}$$

空气中含有 80% 的氮气和 20% 的氧气（体积百分比与质量百分比没有区别），氧气的质量为： $m_{\text{O}_2} = 10^{15} \text{ t}$ 。因而产生于光合作用的最大数量的碳存在于地球沉积物中的有：

$$m_{\text{C}} = \frac{12}{32} m_{\text{O}_2} = 3.75 \times 10^{14} \text{ t}$$

到目前为止已找到 $1.04 \times 10^{13} \text{ t}$ 标准煤。

有理由相信：随着继续勘探，化石能源的储量将继续增加。事实上，近些年的化石能源已知储量还是持续增加的，因为我们发现的比消耗的多。现在还存在一些传言说在中等深度海底里甲烷水合物的储量非常大。这些化合物受热后或者被从海底提出，就会分解成甲烷和水。然而这种可能存在大量储能的前景不能放松我们对储量开采的限制。如果为了满足能源需求我们用完了所有的碳储备物，那我们将实际上进行几百万年前的光合作用的逆过程且正在消耗所有的氧。即使存在超过 $3.75 \times 10^{14} \text{ t}$ 的碳，但没有足够的氧也不能燃烧。

如果我们把调查油和气的消耗量作为一个例子来说明从公元元年起很长一段时间内化石能源的消耗量，图 1.1 给出了非常惊人的图片。直到 20 世纪初，储存能源的消耗几乎都可以忽略。但从 20 世纪开始，它就开始呈指数性上升，并且在之后的一二十年后就达到最大值。随后，由于储备能源逐渐被用完，储备能源的消耗量将再次急剧回落。最大消耗点预期出现在储存量降到其初始水平一半的位置。累积了几百万年的能量将会在 100 年左右的时间内全部消耗。储备能源的消失还是个次要的问题，更糟的是燃烧的产物会导致大气成分的变化，且这种影响将持续很长时间，即便我们后代使用可再生能源来改变能源的方式，但是他们还是会从我们现在所做的事中受害。

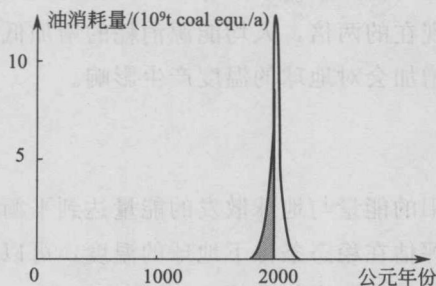


图 1.1 油的每年消耗量

曲线下的面积表示的是估算的油的总储量

1.3 温室效应

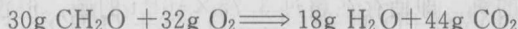
二氧化碳是由于化石能源的载体燃烧产生的。大气中二氧化碳浓度的增加会对我们的气候造成严重影响。当前，大气中包含 0.03% 的二氧化碳，也就是 $2.3 \times 10^{12} \text{ t}$ 二氧化碳。

1.3.1 燃烧

碳燃烧产生二氧化碳，其反应式为： $\text{C} + \text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}_2$ ，根据反应式： $12\text{g C} + 32\text{g O}_2 \longrightarrow 44\text{g CO}_2$ 。由于燃烧产生的二氧化碳的质量可根据 $m_{\text{CO}_2} = 44/12m_{\text{C}}$ 求得，其中 m_{C} 为消耗的碳的质量。为此，可以算出 1t 碳的燃烧可以产生 3.7t 二氧化碳。

不同含碳化合物的关系如下：

① 碳水化合物：



所以， $m_{\text{CO}_2} = 1.47m_{\text{CH}_2\text{O}}$ 。这是食物在人体内消耗的化学反应。

② 甲烷（天然气的主要成分）：



所以， $m_{\text{CO}_2} = 2.75m_{\text{CH}_4}$ 。

目前全球每年消耗 10^{10} t 标准煤，产生 $2.2 \times 10^{10} \text{ t}$ 二氧化碳。这些二氧化碳一半溶于海洋的水中，还有一半存在于大气中。如果每年的能源消耗不再继续增加，200 年后大气中的二氧化碳含量将是现在的两倍。然而，必须考虑到能源消耗是持续增加的。当前，每年增加一个百分点是相对较低的。在发展中国家 1999 年的能源消耗甚至是下降的，因为这些国家没有能力去支付更多的能源费用。但全球能源消耗如果持续以每年 1% 增加，大气中二氧化碳的浓度在 100 年后就会达到现在的两倍，人均能源消耗的增加低于全球人口增长。大气中二氧化碳浓度的增加会对地球的温度产生影响。

1.3.2 地球温度

如果地球吸收太阳的能量与地球散发的能量达到平衡的话，地球的温度将保持恒定不变。为了评估在稳态条件下地球的温度，可以采用辐射定律（后面的章节中将会对此进行推导）进行估算。

在地球上（除了地球的大气层外）接收到来自太阳的能量流密度为

$$j_{\text{E,太阳}} = 1.3 \text{ kW/m}^2$$