

☀ 21世纪新能源·新型太阳能电池译丛



# 太阳能电池的硅晶体生长

## Crystal Growth of Silicon for Solar Cells

【日】 中岛一雄 编 高扬 译  
宇佐美德隆



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

21 世纪新能源·新型太阳能电池译丛

# 太阳能电池的硅晶体生长

Crystal Growth of Silicon for Solar Cells

【日】中岛一雄 编  
宇佐美德隆  
高扬 译



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

## 内容提要

本书主要介绍了应用于太阳能电池的各类硅晶体生长机理、模拟、工艺及特性。本书首先论述了制备硅原料的冶金级硅方法、西门子法和冶金法,然后讨论了生产单晶硅棒的切克罗斯基法和区熔法、生长多晶硅铸锭的定向凝固法、铸造单晶硅技术以及多晶硅铸锭的亚晶界问题,再论述了可以替代硅片的带硅和球形硅技术,解释了制备晶体硅薄膜太阳能电池的液相外延法、气相外延法、闪光灯退火、铝诱导层交换,最后提供了制备太阳能级硅所需的热化学和动力学数据库。本书可以作为物理、材料、化学、光学、电子工程、动力与能源专业或其他相关专业的本科生、研究生和教师学习研究太阳能硅晶体生长技术的参考书。本书也可以作为太阳能研究机构科学家或太阳能企业工程师的参考资料,为研究、开发、生产各种硅晶体提供帮助。

First published in English under the title Crystal Growth of Silicon for Solar Cells edited by Kazuo Nakajima and Noritaka Usami, 1st edition by Springer-Verlag GmbH, DE

Copyright Springer Berlin Heidelberg 2009 \*

This edition has been translated and published under licence from Springer-Verlag GmbH, DE.

上海市版权局著作权合同登记号:图字:09-2018-294

## 图书在版编目(CIP)数据

太阳能电池的硅晶体生长 / (日)中岛一雄, (日)宇佐美德隆编;高扬译. —上海:上海交通大学出版社, 2018  
ISBN 978-7-313-19048-2

I. ①太… II. ①中… ②宇… ③高… III. ①硅太阳能电池—研究 IV. ①TM914.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 037676 号

## 太阳能电池的硅晶体生长

编者: [日]中岛一雄 [日]宇佐美德隆

译者: 高扬

出版发行: 上海交通大学出版社

地址: 上海市番禺路 951 号

邮政编码: 200030

电话: 021-64071208

出版人: 谈毅

印制: 上海春秋印刷厂

经销: 全国新华书店

开本: 787 mm × 1092 mm 1/16

印张: 19

字数: 452 千字

版次: 2018 年 4 月第 1 版

印次: 2018 年 4 月第 1 次印刷

书号: ISBN 978-7-313-19048-2/TM

定价: 88.00 元

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 021-33854186

# 前 言

21 世纪的人类不但要面对日益严重的全球气候变暖,还要试图解决石化资源的逐渐耗竭问题。在未来一个世纪中,大多数自然资源将被耗尽,特别是石油、天然气和铀矿将出现不可避免的短缺。如今,人们认识到应该加快研究开发可再生能源技术,并且大规模发展新能源产业。

太阳能是一种终极自然资源。虽然 30% 的太阳能被地球反射,我们还可以充分地利用 70% 的太阳能。2000 年全世界能源需求量约 9 000 百万吨石油当量 (Million Tonnes Oil Equivalent, MTOE), 而可使用的太阳能是其数千倍。即使在 2050 年,用太阳能只供应全世界能源需求的 10%, 我们也必须连续 40 年每年生产 40 GW 的太阳能电池,这要求每年有 400 000 吨硅原料。我们相信这是一个可以实现的目标,因为这相当于将全世界 2005 年的硅原料产量增加 12 倍。为了实现在 2050 年太阳能占全球能源使用量 10% 这个目标,我们需要发展数种关键材料,考虑到各种材料的生命周期,需要建立清洁能源循环。在数种关键材料中, Si 无疑是最重要的,因为现在 90% 的太阳能电池都基于 Si, 而其发展趋势将是大规模的。

为了推动高转换效率晶体硅太阳能电池的发展,日本东北大学 (Tohoku University) 的材料研究学院 (Institute for Materials Research, IMR) 分别在 2004 年和 2005 年组织了两次国内研讨会,从材料科学的角度探讨太阳能电池的硅晶体生长。随后,IMR 和日本学术振兴会 (Japan Society for the Promotion of Science, JSPS) 的“晶体生长科学技术” (Science and Technology of Crystal Growth) 第 161 号委员会在 2006 年 10 月共同组织了第 1 届晶体硅太阳能电池科学技术国际研讨会 (International Workshop on Science and Technology of Crystalline Si Solar Cells, CSSC)。这个国际研讨会作为一个论坛,为大学、研究机构和产业界的科学家和工程师提供了一个相聚的机会,他们可以从材料科学的角度共同探讨晶体硅太阳能电池发展的最新成果和挑战。CSSC-2 于 2007 年 12 月在中国的厦门举行,而 CSSC-3 于 2009 年 6 月在挪威的特隆赫姆 (Trondheim) 举行。而且,IMR 和 JSPS 第 161 号委员会于 2008 年 5 月在日本的仙台 (Sendai) 的第 4 届亚洲晶体生长和晶体技术会议 (4<sup>th</sup> Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology, CGCT-4) 上组织了“太

阳能电池和清洁能源技术”(Solar Cells and Clean Energy Technology)专题讨论会。本书的多数章节是基于这些会议和论坛的学术讨论文献。编者衷心感谢 CSSC 和 CGCT-4 所有参与者对本书的贡献。

现在有数本介绍太阳能电池总体方面的著作,但是其重点是器件物理学,而晶体生长技术方面的描述较少。甚至可能存在一些误解,认为太阳能电池的晶体生长没有进一步的改进空间。但是,这样的观点有欠妥当。即使对于多晶硅硅片(multicrystalline Si wafer),其宏观特性也可以在晶体生长过程中,通过控制其微观结构加以改变。本书提供的基础知识应该可以为太阳能电池材料的新型晶体生长技术的未来发展做出贡献。

中岛一雄  
宇佐美德隆  
日本 仙台  
2009年7月

# 名词缩写表

缩写	英文全称	中文全称
AgILE	silver-induced layer exchange	银诱导层交换
AIC	aluminum-induced crystallization	铝诱导结晶
ALILE	aluminum-induced layer exchange	铝诱导层交换
ANU	Australian National University	澳大利亚国立大学
APCVD	atmospheric pressure chemical vapor deposition	常压化学气相沉积
ARC	antireflection coating	减反膜
a - Si	amorphous Si	非晶硅
a - Si; H	hydrogenated amorphous Si	氢化非晶硅
bcc	body-centered cubic	体心立方
BSF	back surface field	背表面场
B <sub>TO</sub>	boron bound transverse optical phonon	硼约束横向光学声子
Cat - CVD	catalytic chemical vapor deposition	催化剂化学气相沉积
CDS	crystallisation on dipped substrate	浸泡衬底结晶
CGCT - 4	4 <sup>th</sup> Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology	第 4 届亚洲晶体生长和晶体技术会议
CMP	chemical mechanical polishing	化学机械抛光
CoCVD	convection assisted chemical vapor deposition	对流辅助化学气相沉积
ConCVD	continuous chemical vapor deposition	连续化学气相沉积
c - Si	crystalline Si	晶体硅
CSL	coincidence site lattice	重合位置点阵

CSSC	International Workshop on Science and Technology of Crystalline Si Solar Cells	晶体硅太阳能电池科学技术国际研讨会
CVD	chemical vapor deposition	化学气相沉积
DARC	double layer antireflection coating	双层减反膜
DLTS	deep level transient spectroscopy	深能级瞬态谱
DZW	denuded zone width	洁净区宽度
EBIC	electron beam induced current	电子束诱导电流
EBSD	electron backscatter diffraction	电子背散射衍射
EBSF	electron back scattering diffraction pattern	电子背散射衍射图样
EC	explosive crystallization	爆炸结晶
ECN	Energy research Centre of the Netherlands	荷兰能源研究中心
EFG	edge-defined film-fed growth	边缘限制薄膜生长
EG - Si	electronic grade Si	电子级硅
EL	electroluminescence	电致发光
ELA	excimer laser annealing	准分子激光退火
ELO	epitaxial lateral overgrowth	外延横向过度生长
ELPE	explosive liquid-phase epitaxy	爆炸液相外延
ELPN	explosive liquid-phase nucleation	爆炸液相成核
EMCC	electromagnetic continuous casting	电磁连铸
EMCP	electromagnetic continuous pulling	电磁连续拉晶法
EML	electro-magnetic levitator	电磁悬浮器
ESPE	explosive solid-phase epitaxy	爆炸固相外延
ESPN	explosive solid-phase nucleation	爆炸固相成核
Fe <sub>i</sub>	interstitial Fe,	Fe 间隙
FhG - ISE	Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems	弗劳恩霍夫太阳能系统研究所 (德国)
FLA	flash lamp annealing	闪光灯退火
FWHM	full width at half maximum	半高全宽
g	gas phase	气相

名词缩写表

HEM	heat exchanger method	热交换法
HPD	high-performance design	高性能设计
HSV	high-speed video camera	高速视频相机
IMEC	Interuniversity Microelectronics Centre	校际微电子研究中心(比利时)
IMR	Institute for Materials Research	材料研究学院(日本东北大学)
INL	Institut des Nanotechnologies de Lyon	里昂纳米技术研究所(法国里昂国立应用科学学院)
INSA	Institut National des Sciences Appliquées de Lyon	里昂国立应用科学学院(法国)
ITO	indium tin oxide	氧化铟锡
JAIST	Japan Advanced Institute of Science and Technology	北陆先端科学技术大学院大学(日本)
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency	日本宇宙航空研究开发机构
JSPS	Japan Society for the Promotion of Science	日本学术振兴会
l	liquid phase	液相
LC	laser crystallization	激光结晶
LPCVD	low pressure chemical vapor deposition	低压化学气相沉积
LPE	liquid phase epitaxy	液相外延法
M	matrix	基质
mc-Si	multicrystalline silicon	多晶硅
MG-Si	metallurgical grade silicon,	冶金级硅
MIC	metal-induced crystallization	金属诱导结晶
MTOE	million tonnes oil equivalent	百万吨石油当量
NEEA	Northwest Energy Efficiency Alliance	西北能源效率联盟(美国)
NIST	National Institute of Standard and Technology	国家标准与技术研究院(美国)
NREL	National Renewable Energy Laboratory	可再生能源实验室(美国)
NTNU	Norwegian University of Science and Technology	挪威科技大学
PECVD	plasma-enhanced chemical vapour deposition	等离子体增强化学气相沉积



PHASE	PHysics and Applications of SEmiconductors laboratory	半导体物理和应用实验室(法国)
PL	photoluminescence	光致发光
PPH	production per hour	每小时产量
PVD	physical vapor deposition	物理气相沉积
RGS	ribbon growth on substrate	衬底带硅生长
RRV	radial resistance variation	径向电阻变化
RST	ribbon on a sacrificial template	牺牲模板带硅
RTA	rapid thermal annealing	快速热退火
RTCVD	rapid thermal chemical vapor deposition	快速热化学气相沉积
RTP	rapid thermal processing	快速热处理
s	solid phase	固相
SEM	scanning electron microscopy	扫描电子显微镜
SIMS	secondary ion mass spectrometry	二次离子质谱
SINTEF	The Foundation for Scientific and Industrial Research	科技工业研究院(挪威)
SoG - Si	solar grade silicon	太阳能级硅
SOI	silicon on insulator	绝缘体上硅
SOLSILC	solar grade silicon at low cost	低成本太阳能级硅
SPC	solid-phase crystallization	固相结晶
SPE	solid phase epitaxy	固相外延
SR	string ribbon	线带
SSI	Siemens Solar Industries	西门子太阳能公司(德国)
STC	silicontetrachloride	四氯化硅
STD	standard design	标准设计
TCO	transparent conductive oxide	透明导电氧化物
TCS	trichlorosilane	三氯氢硅
TDM	temperature difference method	温度差法
TEM	transmission electron microscopy	透射电子显微镜

名词缩写表

---

UMG - Si	upgraded metallurgical grade silicon	高纯冶金级硅
UNSW	University of New South Wales	新南威尔士大学(澳大利亚)
VPE	vapor phase epitaxy	气相外延法
XRD	X - ray diffraction	X 射线衍射
ZnO: Al	Al - doped zinc oxide	掺铝氧化锌
$\mu\text{c} - \text{Si}; \text{H}$	hydrogenated microcrystalline Si	氢化微晶硅

## 参数符号表

符号	中文名称	英文名称
$A$	反应腔底部面积	area of the bottom of the reactor
$A_i$	元素 $i$ 的摩尔表面面积	molar surface area of element $i$
$A_s$	熔渣有效质量转移面积	effective mass transfer area in slag
$A_{total}$	总面积	total area
$a$	液相和固相热扩散率的比例	ratio of liquid to solid heat diffusivity
$a$	比例系数	coefficient of proportionality
$a_B$	B 的活性系数	activity of B
$a_{BO_{1.5}}$	$BO_{1.5}$ 的活性系数	activity of $BO_{1.5}$
$a_{epi}$	外延层晶格常数	lattice constant of epitaxial layer
$a_{Si}$	Si 的活性系数	activity of Si
$a_{SiO_2}$	$SiO_2$ 的活性系数	activity of $SiO_2$
$a_{sub}$	衬底晶格常数	lattice constant of substrate
$b$	伯氏矢量	Burgers vector
$b$	液相和固相热导率的比例	ratio of liquid to solid heat conductivity
$C$	给定时间液相中杂质浓度	concentration of impurities in liquid at a given time
$C$	给定时间颗粒浓度	concentration of particles at a given time
$C$	溶质浓度	solute concentration
$C_C$	C 浓度	concentration of C
$C_{evp}$	比蒸发常数	specific evaporation constant
$C_g$	气体中 Si 浓度	concentration of Si in gas

$C_i$	初始 O 浓度	initial oxygen concentration
$C_{in}$	初始液相中杂质浓度	initial concentration of impurities in liquid
$C_L$	溶解度极限	solubility limit
$C_l$	液相中杂质浓度	concentration of impurities in liquid
$C_p^l$	液相热容量	heat capacity of liquid phase
$C_{Si}^l$	液相中 Si 浓度	concentration of Si in liquid
$C_{max}$	最大浓度	maximum concentration
$C_O$	间隙 O 浓度	interstitial oxygen concentration
$C_s$	固相中杂质浓度	concentration of impurities in solid
$C_s$	衬底上 Si 浓度	concentration of Si on substrate
$C_s$	饱和浓度	saturation concentration
$C_s$	O 溶解度	oxygen solubility
$\bar{C}_s$	平均相对固体杂质含量	mean relative impurity content of the solid
$C_{s,a}$	冷却前饱和浓度	saturation concentration before cool down
$C_{s,b}$	冷却后饱和浓度	saturation concentration after cool down
$C_{Si}$	Si 浓度	Si concentration
$C_{SiC}$	SiC 颗粒浓度	concentration of SiC particles
$C_{Si}^s$	固相中 Si 浓度	concentration of Si in solid
$C_0$	初始颗粒浓度	initial concentration of particles
$C_0$	初始 C 浓度	initial concentration of C
$C_0$	初始溶质浓度	initial solute concentration
$C^*$	临界浓度	critical concentration
$C_a^*$	冷却前临界浓度	critical concentration before cool down
$C_b^*$	冷却后临界浓度	critical concentration after cool down
$c$	比热容	specific heat capacity
$c_{sp}$	固相比热容	specific heat capacity of the solid phase
$D$	相邻位错距离	distance between adjacent dislocations

$D$	扩散系数	diffusion coefficient
$D_g$	气体扩散率	diffusivity of gas
$D_i$	杂质扩散率	impurity diffusivity
$D_l$	液相杂质扩散常数	diffusion constant of impurity in liquid
$D_O$	O 扩散率	oxygen diffusivity
$D_{Si}$	Si 的扩散系数	diffusion coefficient of Si
$D_s$	固相杂质扩散常数	diffusion constant of impurity in solid
$D_{th}$	热扩散系数	thermal diffusion coefficient
$D_0$	杂质扩散率前指数因子	impurity diffusivity preexponential factor
$d$	带硅厚度	ribbon thickness
$d$	平均晶粒尺寸	average grain size
$d_{Si}^{liq}$	液相 Si 密度	density of liquid Si
$d_{Si}^{sol}$	固相 Si 密度	density of solid Si
$E_A$	激活能	activation energy
erf	误差函数	error function
$F_d$	阻力	drag
$F_g$	相对重力	relative gravity
$F_g$	气体中气流	gas flow in gas
$F_s$	衬底上气流	gas flow on substrate
$f$	液相剩余比例	fraction remaining in liquid
$f_B$	熔体相中 B 的活度系数	activity coefficient of B in metal phase
$f_s$	固相比例	solid fraction
$f_x$	熔体相中成分 $x$ 的活度系数	activity coefficient of component $x$ in metal phase
$G_C$	C 形成速率	formation rate of C
$E_x G_i^\phi$	过剩吉布斯能	excess Gibbs energy
$G_L$	液相热梯度	thermal gradient in the liquid
$G_S$	固相热梯度	thermal gradient in the solid

$G_{\text{SiC}}$	SiC 颗粒形成速率	formation rate of SiC particles
$G_{\text{A}_p\text{B}_q}^0$	化学计量化合物 $\text{A}_p\text{B}_q$ 的吉布斯能	Gibbs energy of stoichiometric compound $\text{A}_p\text{B}_q$
${}^0G_i^\phi$	元素 $i$ 的吉布斯能	Gibbs energy of element $i$
$g$	重力加速度	gravitational acceleration
$h$	单位质量的焓	enthalpy per unit weight
$h_{\text{eff}}$	有效传热系数	effective coefficient of heat transfer
$h_g$	质量输运系数	mass transport coefficient
$h_{\text{sf}}$	凝固热	solidification heat
$i$	深度步长	depth step
$K$	平衡常数	equilibrium constant
$K_m$	熔点的晶体热传导率	thermal conductivity of crystal at melting point
$k$	偏析系数	segregation coefficient
$k_B$	玻尔兹曼常数	Boltzmann constant
$k_{\text{eff}}$	有效偏析系数	effective segregation coefficient
$k_i^{\text{eq}}$	平衡分配系数	equilibrium distribution coefficient
$k_i$	杂质偏析系数	segregation coefficient of impurity
$k_L$	液相热导率	thermal conductivity of the liquid
$k_m$	熔体中质量转移系数	mass transfer coefficient in metal
$k_S$	固相热导率	thermal conductivity of the solid
$k_s$	熔渣中质量转移系数	mass transfer coefficient in slag
$k_s$	表面动力系数	surface kinetic coefficient
$k_t$	总质量转移系数	total mass transfer coefficient
$k_{x \rightarrow \%}$	摩尔分数质量百分比系数	efficient for molar fraction to the mass percentage
${}^2k_0^i$	$i$ 在 Si - $i$ 二元系统中的分配系数	distribution coefficient of $i$ in Si - $i$ binary system
${}^3k_0^i$	$i$ 在 Si - $i$ - $j$ 三元系统中的分配系数	distribution coefficient of $i$ in Si - $i$ - $j$ ternary system
$L$	熔化潜热	latent heat of fusion
$L$	反应腔几何特征	geometrical characteristics of the reactor

参数符号表

$L$	耗尽区宽度	depletion region width
$L_B$	B 分配系数	distribution coefficient of B
$L_{\max}$	熔化区域高度	molten zone height
$L_T$	热扩散长度	thermal diffusion length
$M$	迁移率系数	mobility coefficient
$M_g$	气体摩尔质量	molar mass of gas
$M_0$	迁移率系数前指数因子	mobility coefficient preexponential factor
$M_s$	熔渣中成分 $x$ 的摩尔质量	molar mass of component $x$ in slag
$M_x$	熔体中成分 $x$ 的摩尔质量	molar mass of component $x$ in metal
$m_{Si}$	液相线曲线的斜率	slope of liquidus curve
$N$	单位体积晶体内的 Si 原子数	number of Si atoms per unit volume in crystal
$N_d$	单位体积晶体内掺杂剂数量	number of dopant atoms per unit volume in crystal
$N_{\infty}$	最终晶粒数量	final number of grains
$n$	峰值数	number of peaks
$n$	单位体积内气体分子数	number of gas molecules in unit volume
$n$	时间步长	time step
$P$	气体压强	gas pressure
$P_d$	掺杂剂气体分压	partial pressure of dopant gas
$P_{O_2}$	$O_2$ 分压	partial pressure of $O_2$
$P_{Si}$	Si 先驱物气体分压	partial pressure of Si precursor gas
$Q_{\Lambda}$	焦耳单位激活能	activation energy in Joule
$Q_{ht}$	加热器功率	heater power
$R$	气体常数	gas constant
$R_c$	冷却速率	cooling rate
$R_{(100)}$	(100) 择优取向百分比	percentage for preferential (100) orientation
$R_{(110)}$	(110) 择优取向百分比	percentage for preferential (110) orientation
$R_{(111)}$	(111) 择优取向百分比	percentage for preferential (111) orientation
$Re$	雷诺数	Reynolds number

$r_g$	晶粒半径	grain radius
$r_p$	颗粒半径	particle radius
$S$	光源项	light source term
$S$	过饱和	supersaturation
$S^*$	临界过饱和	critical supersaturation
$s$	液相-固相界面长度	length of the liquid-solid interface
$T_A$	液相线温度	liquidus temperature
$T_a$	退火温度	annealing temperature
$T_E$	最终温度	end temperature
$T_{eu}$	共晶温度	eutectic temperature
$T_l$	液相温度	liquid temperature
$T_m$	熔点	melting point
$T_{max}$	最大退缩性温度	maximum retrograde temperature
$T_n$	成核温度	nucleation temperature
$T_s$	表面温度	surface temperature
$T_0$	界面表面温度	temperature of boundary surface
$T_0$	边界温度	boundary temperature
$t$	时间	time
$t$	持续时间	duration
$t_a$	退火时间	annealing time
$t_g$	生长时间	growth time
$t_n$	成核时间	nucleation time
$V_m$	熔体流动速度	velocity of melt flow
$V_p$	颗粒体积	volume of the particle
$V_r$	反应腔体积	volume of the reactor
$v_g$	气体速度	gas velocity
$v_g$	晶粒生长速度	grain growth velocity
$v_i$	单元距离比例	ratio of distance between elements



参数符号表

$v_m$	熔体速度	melt velocity
$v_m^L$	最大拉晶速度	maximum pulling velocity
$v_p$	拉晶速度	pulling speed
$v_s$	沉淀速度	settling velocity
$W$	带硅宽度	ribbon width
$x$	基座上的位置	position on the susceptor
$x_i^L$	液相中杂质摩尔分数	molar fraction of impurity in liquid phase
$x_i^L$	液相线摩尔比例	liquidus mole fraction
$x_i^S$	固相中杂质摩尔分数	molar fraction of impurity in solid phase
$x_i^S$	固相线摩尔比例	solidus mole fraction
$x_i^\phi$	元素 i 的摩尔比例	mole fraction of element i
$x_{Si}^\phi$	Si 的摩尔比例	mole fraction of Si
$y$	生长方向坐标	coordinate in growth direction
$\alpha$	化学反应相关因子	correlation factor of chemical reaction
$\alpha_s$	固相热扩散率	thermal diffusivity of the solid phase
$\beta_1$	偏析比例	segregation ratio
$\gamma$	表面张力	surface tension
$\gamma_{BO_{1.5}}$	熔渣相中 $BO_{1.5}$ 的活度系数	activity coefficient of $BO_{1.5}$ in slag phase
$\gamma_i^L$	液相中杂质活度系数	activity coefficient of impurity in liquid phase
$\gamma_i^S$	固相中杂质活度系数	activity coefficient of impurity in solid phase
$\gamma_x$	熔渣相中成分 $x$ 的活度系数	activity coefficient of component $x$ in slag phase
$\gamma_i^\phi$	杂质 i 活度系数	activity coefficient of impurity i
$\delta$	边界层厚度	boundary layer thickness
$\delta e$	外延层厚度	thickness of the epitaxial layer
$\Delta G_I^E$	界面偏析过剩摩尔吉布斯能	excess molar Gibbs energy of interfacial segregation
$\Delta G^0$	吉布斯能变化	Gibbs energy difference
$\Delta_f G_{A_p B_i}^0$	形成化合物的吉布斯能	Gibbs energy of formation of the compound
$\Delta G_1^0$	标准偏析摩尔吉布斯能	standard molar Gibbs energy of segregation