

象 現 面 界 陷 欠 子 格

編 集

有 山 兼 孝	三 宅 靜 雄
茅 誠 司	武 藤 俊 之 助
小 谷 正 雄	永 宮 健 夫

物 性 物 理 学 講 座

10

53.81
212
=10

象 現 面 界 陷 欠 子 格

編 集

有山兼孝 三宅静雄
茅 誠 司 武藤俊之助
小谷正雄 永宮健夫

物性物理学講座 10



共立出版株式会社



物性物理学講座 10

©

界面現象・格子欠陥

定価 600 円

昭和 34 年 1 月 25 日 初版 1 刷発行
昭和 34 年 12 月 1 日 初版 3 刷発行

編著者 武藤 俊之助

発行所 南條 初五郎

東京都千代田区神田駿河台 3-9

印刷者 平尾 秀吉

東京都新宿区市ヶ谷本村町 27

印刷所 新日本印刷株式会社

東京都新宿区市ヶ谷本村町 27

発行所 東京都千代田区
神田駿河台 3-9

共立出版株式会社

電話東京 29 局 2951・2952
2953・2954
装訂東京 57095

NDC 428.

製本 澁川製本社

Printed in Japan

序

本巻には界面現象（第 12 編）と格子欠陥（第 13 編）とについて解説されている。これまで発刊され本講座各巻の解説において、すでに多かれ少かれ格子欠陥や界面現象に関連した内容が断片的に散見されることに気づかれるであろう。それにもかかわらず本巻において系統的解説がなされるのにはまたそれだけの理由がある。すなわちこの方面における基礎及び応用両面にわたる最近の研究の動きから、その重要性が認められるばかりでなく、これを独立した表題のもとに解説することが極めて適切であると考えられるほどその研究成果は近頃急速に集積しつつあるといつてよいからである。といつても問題の性質上まだまだ未解決の問題は多くその実質的解明は将来の課題であろうと思われるが、兎も角も私たちは一昔前の時代に比べてかなり多くのことを明らかにし得たといつてよいであろう。

実際結晶の表面というのは一般に複雑な構造をもっているものであつて、例えば理想的結晶格子の周期性が理想的に断ち切られたような構造をもっているものは現実にはほとんど存在しないといつてよい。しかもこうした複雑な構造に現象それ自身余り影響を受けない種類のものであれば、表面構造という面倒な問題にふれずにある程度現象の整理ができるわけであるが、第 12 編に解説されている諸現象はかかる表面構造に敏感に左右されることが多くの研究結果からわかっているのもので、どうしても正面からこの問題に立ち向わなければならないことになる。否むしろ表面構造に敏感に影響されると考えられる諸現象の研究を通して実験及び理論両面から表面特性を追究しているのが研究の実相であるといつてよい。そして実際にどのような現象を捕え、これをどのような方法で研究し、またどのような成果が得られてきたかについては、この方面の第一線研究者によって本巻に解説された具体的内容を読まれれば明らかになるであろう。とも角も界面現象は結晶内部の特性を研究する分野に対立する独立した研究分野であり、その性質上応用面とも密接な関連をもつことを強調してお

きたい。

次に格子欠陥が独立した研究分野として発展しつつある事情については、ごく大まかに次の如く述べる事ができよう。すなわち私たちの具体的に取扱う結晶はどのように注意深く生成しても多かれ少かれ不完全であるし、熱振動、光照射などによる電子励起などの過程において結晶内原子は完全格子上に規則正しく配列しているような理想的結晶ではない。しかも界面現象の場合におけると同様に、こうした結晶の不完全さが余り敏感に影響しない現象及び影響する現象とが一昔前の極めて大まかな経験的分類の段階から脱して最近におけるように原子的機構に基くかなり立ち入った諸研究により次第に明らかになってきた。概観していえば私たちの固体物性に関する研究は理想化された結晶模型の段階から現実の不完全結晶に向ってかなり前進してきたといつてよいと思われる。実際最近の固体物性の研究は多かれ少かれ格子欠陥にかんれんした考察を含めぬものはほとんどないといつてもよいほどである。しかしこのような研究分野の現状は極めて多彩であり、また多岐にわたっている。そこでその中特に目覚ましい発展を示しつつある課題を選んで解説したものが第 13 編の内容である。具体的に格子欠陥に関するどのような知識がどのような考察を経て得られてきたか、また将来に残された問題はどのようなものであるかといったことを、読者は本編の、第一線研究者によって述べられた解説を通して学ばれるであらう。

実際界面現象、格子欠陥ともに研究現状は活発に働いているものであり、したがって多岐にわたっているので、読者は第 12 編及び第 13 編の各序説に説かれた内容をまず読んでこの方面の概観を一通理解した後に、各論の解説に進まれることを特に勧めたいと思う。

昭和 33 年 12 月 29 日

武藤俊之助

頁	行	誤	正
1	↓ 6	対す表面	対する表面
"	↓ 10	団体の	固体の
4	↑ 9	SiC ; Se	SiC や Se
7	↓ 1	平衡反応は交換反応	交換反応は平衡反応
10	↓ 7	仕面事数	仕事函数
14	↑ 8	より,	よい.
15	↓ 2	$q - \epsilon\omega$	$q_0 - \epsilon\omega$
18	↑ 13	T 測	T で測
22	↑ 6	(2.2.1)*式	(2.4) 式
28	↑ 9	の他;	の他に
92	↓ 5	定常状態	熱平衡状態
94	(4.8)式	$i = i_n + i_p = eB \dots$	$i = i_n + i_p = qB \dots$
104	↓ 11~12	電圧のところ, …低いは	おおよそ順方向での低い電圧のところは
115	↑ 11	W. W.	W. N.
122	↓ 6	尺度で, 平滑で	尺度で平滑で
123	↓ 8	もっと	もつと
129	↑ 10	膜薄	薄膜
133	↓ 4	示されたものは	示されたものは
133	↓ 7	下記の如く訂正 幅が膜厚の増大にともなう減少し, 極大極小を与える膜厚の値も吸収しない場合の値から変化する. 図 5.11 は Hammer の実	
140	↓ 10~11	$\bar{f}$ (2 箇所)	$\langle f \rangle$
142	↑ 6	D に対す比	D に対する比
143	↓ 1	ニルミエネルギー	ルミ・エネルギー
146	↑ 1	蒸着後直	蒸着直後
147	↓ 10	微細粒は	微細粒子は
149	図 5.32 説明 ↓ 2	磁化原子層の厚さ $2\text{\AA}$ は	磁化, 原子層の厚さは $2\text{\AA}$
150	↑ 7	$(M_s/\partial T)_{T=0}$	$(\partial M_s/\partial T)_{T=0}$
153	↑ 1	立方体内部	立方体内部
154	↑ 2	についての直径	についてはその直径
156	↓ 8	ボア-半径 $\hbar^2 me^2$	ボア-磁子 $ek/2mc$
"	↑ 1	における大き	における歪力の大き
161	↑ 7	電子遷移	光学遷移
170	↑ 4	結晶を	結果を
175	↑ 2	$C_s(g) = K_0/C_L(g)$	$C_s(g) = K_0 C_L(g)$
"	↑ 1	$C_s(0) = C_0/K_0$	$C_s = C_0 K_0$
182	↓ 2	酸や石英	酸素や石英

頁	行	誤	正
200	表 2-2 見出	形式エネルギー	形成エネルギー
211	図 2-17	相対電導率	相対導電率
"	図 2-18	相対電導率	相対導電率
"	"	8×10^{-13}	8×10^{13}
212	(2.42) 式	$\frac{\partial \mu_i(p)}{\partial p} =$	$\frac{\partial \log \mu_i}{\partial p} =$
213	↑ 1	きる	きる ^(b),7)
223	↓ 11	r_{i+1}, r_{i+2}	r_{i+1}, r_{i+2}
231	脚注	Kleinschrot	Kleinschrod
232	↓ 8	$(E_e/E) \cong (n+2)^2/9$	$(E_e/E)^2 \cong (n^2+2)^2/9$
233	↑ 5	$-(I_i+1)$	$-(I_i-1)$
"	↑ 4	Π_i	Π_i
237	↓ 2	波動函数	波動函数
238	↓ 8	調和振動	調和振動子
239	図 3-6	1.8	2.0
"	図 3-6	1.4	1.6
242	(3.29)式	$\int_0^t$	$\int_0^{t_1}$
"	図 3.7	100°C で	-100°C で
245	↑ 7	-15°C	-75°C
246	(3.31)式	τ_F	τ_F'
248	↓ 6	68)	58)
249	↑ 4	拡散する	拡散し去る
251	表 3-12	0.21 1.18 0.18	0.21 1.07 0.18
"	↑ 7	この考えでは	それだけでは
"	↑ 6	Lambe らの……(次頁6行目)む ずかしい。	この問題については Compton と Klick の最近の論文 [Phys. Rev 112, No. 5] を参照していただき たい。
252	↓ 8	N	M
"	↑ 3	共鳴伝達され	共鳴伝達 ^{7a)} され
253	↑ 1	200 Å の	200 Å, 450°C で 500 Å の
254	↓ 2	770 mμ,	770 mμ, 850 mμ,
256	↓ 5	I 原子	I 原子
261	↓ 1	結晶を	結果も
262	図 3-21	F 光をあてたときの F	F 光をあてたときの F
264	↑ 8	NaCl では	NaCl, KBr では
"	↑ 1	理論値とバンド	理論値と V_1 バンド
265	↓ 5	$p\pi_u \rightarrow$	$p\sigma_u \rightarrow$

頁	行	誤	正
266	↓ 12	なバースト	バースト
267	"	からなる.	からなる,
267	↓ 5	一つついて	くっついて
271	脚注	K	KI
275	↑ 11	V バンド	U バンド
277	↓ 14	水素原子	水素原子核
"	↑ 5	図 3-29	図 3-28
279	↑ 5	増加する.	増加する (図 3-30 ((d)).
"	↑ 4	だけになる (図 3-30 (d)).	だけになる.
280	表 3-21	NaCl : Sr 595***	NaCl : Sr 505***
281	↓ 14	転移	転換
282	↓ 1	± 0.0 ,	± 0.03 ,
"	↓ 5	(a)	(d)
285	↑ 5	$-e$	e
"	(3-36)式	e^2	$-e^2$
286	↑ 5	$r_1 > R$	$r_1 < R$
"	↑ 4	$+\int_{r < R}$	$+\int_{r > R}$
288	脚注の ↓ 1	114)	113)
290	27)	<i>Halbleiterprobleme</i>	<i>Halbleiterprobleme</i>
"	40)	Ross	Roos
291	69)	Butterworth	Butterworths
"	↑ 12	33)	83)
293	154)	Tast	Taft
294	↑ 8	(印刷中)	112 (1958) 337
297	↑ 11	θ の関係	θ の関係
311	(4-77)式	$\dots + \pi\alpha\beta \left\{ 2 \left(\frac{T_m}{E_d} \right)^{1/2} - \dots \right.$	$\dots + \pi\alpha\beta \left\{ 2 \left[\left(\frac{T_m}{E_d} \right)^{1/2} - \dots \right. \right.$
332	↓ 5	乱 数	散 乱
333	(4-182) 式	$I =$	$I_s =$
338	↑ 5	$Ncf =$	$Ncf =$
339	↑ 2	(1945)	1955

第10卷 執筆 者

第12編 界面現象

電 氣 通 信 研 究 所	小 林 秋 男
東京芝浦電氣株式會社研究所	宮 沢 久 雄
マツダ研 究 所	鳩 山 沼 夫
電 氣 試 験 所	嶋 沼 芳 郎
名古屋大學教養部	

第13編 格子欠陥

東京大學理學部	植 村 泰 忠
ソニ株式會社	岩 田 三 郎
大阪大學工學部	吹 田 德 雄
大阪市立大學理學部	小 島 忠 宣
東京大學工學部	橋 口 隆 吉
富士写真フイルム研究所	木 榮 一

(執筆 順)

目 次

第12編 界面現象

第1章 は し が き

小 林 秋 男

1.1 金 属 の 表 面.....	1
1.2 半 導 体 の 表 面.....	3
文 献.....	7

第2章 吸着現象と触媒作用

小 林 秋 男

2.1 セシウムのタングステンへの吸着.....	9
2.2 単分子吸着の理論.....	13
2.3 清浄表面を得る技術.....	15
2.4 場電子顕微鏡による吸着、表面拡散の研究.....	17
2.5 Sticking Probability.....	22
2.6 吸着状態と固体表面の物性.....	24
2.7 吸着状態のスペクトル的研究.....	28
2.8 吸着と触媒作用.....	30
文 献.....	34

第3章 電 子 放 射

宮 沢 久 雄

3.1 熱 電 子 放 射.....	37
3.1.1 Richardson の式.....	37
3.1.2 空間電荷制限電流.....	39
3.1.3 熱電子のエネルギー分布.....	41
3.1.4 冷 却 効 果.....	44

3.1.5 Schottky 効果	45
3.1.6 透 過 率	47
3.1.7 仕事函数と Richardson 常数	48
3.1.8 結晶面による仕事函数の異方性	51
3.1.9 吸着層による仕事函数の変化	53
3.2 電 場 放 射	56
3.2.1 Fowler-Nordheim の式	56
3.2.2 電場放射電子のエネルギー分布	59
3.2.3 電場放射顕微鏡	61
3.3 二 次 電 子 放 射	62
3.3.1 二次電子の利得	62
3.3.2 二次電子のエネルギー分布	67
3.3.3 イオン衝撃による二次電子放射の特異性	69
3.4 光 電 子 放 射	74
3.4.1 表面効果と体積効果	74
3.4.2 限界波長と Fowler の式	76
3.4.3 光電子のエネルギー分布	78
3.4.4 量子効果とその分光分布	82
参 考 文 献	85

第4章 整 流 現 象

鳩 山 道 夫

4.1 鉱石検波器と金属整流器	87
4.2 半導体の電子論	88
4.3 p-n ジャンクション	91
4.4 運び手の注入と擬 Fermi 準位	95
4.5 注入された運び手のふるまい, 平均寿命	98
4.6 再結合中心と逆方向電流	103

4.7 実在の p-n ジャンクション	104
4.8 トランジスター	107
4.9 整流層に対する光の影響	110
4.10 表面単位と接点整流器	111
4.11 表面単位のない整流層	113
文 献	113

第5章 薄膜の物理学

飼 沼 芳 郎

5.1 薄膜の形成過程と聚合状態	115
5.1.1 下地温度または蒸着速度の臨界値	115
5.1.2 分子の沿面移動	117
5.1.3 単 分 子 層	118
5.1.4 微細結晶の方位配列	118
5.1.5 蒸着速度と聚合状態	120
5.1.6 結晶表面の格子不整、吸着分子、ならびにあらかじめ蒸着 された微細結晶	122
5.1.7 蒸気の流れの下地面に対する方向	124
5.1.8 蒸着薄膜の結晶構造	125
5.1.9 蒸着薄膜の歪力	127
5.1.10 蒸着薄膜の液固間相転移	129
5.2 薄膜の光学的性質	130
5.2.1 光 学 的 性 質	131
5.2.2 光 学 常 数	135
5.2.3 聚合状態と光学常数	136
5.3 薄膜の電気的性質	140
5.3.1 薄膜の厚さと電気抵抗	141
5.3.2 一様な厚さの薄膜	142

5.3.3 数多くの島からなる薄膜	144
5.3.4 電気抵抗の温度変化	145
5.3.5 電気抵抗の経時変化	146
5.4 薄膜の磁氣的性質	148
5.4.1 自 発 磁 化	148
5.4.2 磁 化 曲 線	151
5.4.3 磁 区 構 造	152
5.4.4 磁化曲線と磁区構造	154
5.4.5 歪力と磁氣的性質	155
参考書ならびに綜合報告	157

第 13 編 格 子 欠 陥

第 1 章 序 説

植村泰忠・岩田三郎

1.1 格子欠陥の物理学	159
1.1.1 そ の 発 展	159
1.1.2 格子欠陥の要素	163
1.1.3 最近の研究から	169
1.2 格子欠陥の制御の技術	174
1.2.1 偏 析	175
1.2.2 帯 域 純 化	180
1.2.3 単結晶製造の実際の方法	183
1.2.4 溶質濃度を变化させる方法	187
文 献	189

第 2 章 イオン伝導および拡散現象

吹 田 徳 雄

2.1 イオン伝導現象	191
-------------	-----

2.1.1 空間電荷と Ohm の法則	191
2.1.2 低温領域と高温領域	192
2.1.3 Faraday の法則と輸率	194
2.2 格子欠陥とイオン伝導	196
2.2.1 格子欠陥	196
2.2.2 格子欠陥によるイオン伝導の説明	201
2.3 構造に敏感な領域のイオン伝導	202
2.3.1 異種原子と格子欠陥	202
2.3.2 異種原子が存在するときのイオン伝導機構	206
2.4 イオン伝導に影響をおよぼす二三の因子	210
2.4.1 静水圧の影響	210
2.4.2 塑性変形の影響	213
2.4.3 放射線の影響	213
2.5 拡散現象	214
2.5.1 拡散とイオン伝導との関係	214
2.5.2 放射性追跡子による拡散係数の測定	217
2.6 酔歩の方法と相関係数	220
2.6.1 拡散による相関性	220
2.6.2 ハロゲン化銀の自己拡散とイオン伝導	224

第3章 色 中 心

小 島 忠 宣

3.1 F 中 心	229
3.1.1 光吸収と蛍光	229
3.1.2 電子スピン共鳴	233
3.1.3 F 中心の生成エネルギー	235
3.1.4 配置座標モデル	236
3.1.5 α 及び β バンド	240

3.2 F 中心を含む結晶の電氣的性質と F' 中心	241
3.3 複合電子捕獲中心	246
3.3.1 光化学変化	246
3.3.2 螢光	250
3.4 コロイド	253
3.5 付加着色による V 中心	255
3.6 X 線着色	258
3.7 V 中心のモデル	263
3.8 X 線着色の機構	268
3.9 U 中心	275
3.10 Z 中心	278
3.11 光電放出	283
3.12 F 中心の電子構造	285
綜合報告	289
引用文献	289

第4章 照射損傷

橋 口 隆 吉

4.1 緒言	295
4.2 Coulomb 散乱の理論	295
4.2.1 古典力学的 Coulomb 散乱	295
4.2.2 Rutherford 散乱の法則	298
4.2.3 遮蔽効果	299
4.2.4 核的衝突の性格	303
4.2.5 ノック・オン原子	306
4.2.6 散乱断面積	306
4.2.7 平均自由行路	307
4.2.8 Coulomb 衝突によるエネルギーの損失	309

4.3 相対論的 Coulomb 衝突	309
4.4 中性子の衝突	312
4.5 電子的衝突—電子の励起	313
4.6 荷重粒子の衝突の種々の限界エネルギー	314
4.7 はじき出された原子の数	316
4.7.1 はじき出された一次原子	316
4.7.2 一次原子によってはじき出された二次原子	317
4.7.3 はじき出された原子の総数	319
4.7.4 実験との比較	319
4.8 はじき出しのエネルギーの実験値	321
4.9 照射によってできる各種の格子欠陥	322
4.9.1 温度スパイク	323
4.9.2 転位の形成	328
4.10 金属の照射損傷	330
4.10.1 電気抵抗	330
4.10.2 機械的性質	332
4.11 黒鉛の照射損傷	333
4.12 半導体の照射損傷	334
4.13 ウランの照射成長	336
4.14 その他の固体の照射損傷	337
文 献	339

第5章 写真感光現象

水 木 栄 一

5.1 物性物理学から見た写真感光現象	341
5.2 写真潜像の本体	342
5.3 ハロゲン銀・ゼラチン写真乳剤	343
5.3.1 焼出型と現像型の乳剤	343

5.3.2	写真感光層の構造と乳剤粒子	344
5.3.3	写真乳剤の製造	345
5.3.4	写真用ゼラチンの役割	345
5.4	写真効果の特性	346
5.4.1	特性曲線	346
5.4.2	写真露光の相反則の不成立	347
5.4.3	潜像形成の能率と光吸収の速度	347
5.5	ハロゲン銀結晶の基礎的物性	349
5.5.1	結晶の履歴と物性	349
5.5.2	理想結晶としての物性	349
5.5.3	結晶欠陥	350
5.5.4	暗電導とイオン電導	355
5.5.5	光吸収	358
5.5.6	光電導とキャリア（電子と正孔）の移動度と寿命	362
5.5.7	ルミネッセンス	373
5.5.8	光化学変化（光分解暗化）	375
5.6	写真乳剤における潜像形成の基礎機構	383
5.6.1	Mitchell の理論	383
5.6.2	Gurney-Mott の理論	390
5.7	潜像形成の能率の低照度不軌の原因	390
5.8	潜像形成の増感の機構	392
5.8.1	前熟成による増感	393
5.8.2	後熟成による増感（化学増感）	394
5.8.3	色増感	395
5.9	潜像の現象	396
	文 献	398
	索 引	1~6