

Comprende versione
ebook



William D. Callister • David G. Rethwisch

Materiali per l'Ingegneria Civile ed Industriale

II Edizione

A cura di

MP. Pedferri
L. Montanaro

P. Colombo
M.V. Diamanti
C. Siligardi
J. M. C. Tulliani
T. Valente



Accedi ai contenuti digitali

Espandi le tue risorse
un libro che **non pesa**
e si **adatta** alle dimensioni
del **tuoi lettore!**



Utilizza il codice personale contenuto nel riquadro per registrarti al sito **edisesuniversita.it** e attivare la tua **area riservata**. Potrai accedere alla **versione digitale** del testo e a ulteriori **materiale didattico**.

Scopri il tuo **codice personale** grattando delicatamente la superficie

Il volume NON può essere venduto, né restituito, se il codice personale risulta visibile.
L'accesso al materiale didattico sarà consentito **per 18 mesi**.

Per attivare i **servizi riservati**, collegati al sito **edisesuniversita.it** e segui queste semplici istruzioni

Se sei registrato al sito

- clicca su *Accedi al materiale didattico*
- inserisci email e password
- inserisci le ultime 4 cifre del codice ISBN, riportato in basso a destra sul retro di copertina
- inserisci il tuo **codice personale** per essere reindirizzato automaticamente all'area riservata

Se non sei già registrato al sito

- clicca su *Accedi al materiale didattico*
- registrati al sito o autenticati tramite facebook
- attendi l'email di conferma per perfezionare la registrazione
- torna sul sito **edisesuniversita.it** e segui la procedura già descritta per *utenti registrati*



I contenuti digitali sono accessibili dalla propria **area riservata** secondo la procedura indicata nel frontespizio.

Dalla sezione **materiali e servizi** della tua area riservata potrai accedere all'**Ebook**, ovvero la versione digitale del testo in formato epub, standard dinamico che organizza il flusso di testo in base al dispositivo sul quale viene visualizzato. Fruibile mediante l'applicazione gratuita Bookshelf, consente una visualizzazione ottimale su lettori e-reader, tablet, smartphone, iphone, desktop, Android, Apple e Kindle Fire.

L'accesso ai contenuti digitali sarà consentito per **18 mesi**

Materiali per l'Ingegneria Civile ed Industriale

William D. Callister, Jr.

Department of Metallurgical Engineering
The University of Utah

David G. Rethwisch

Department of Chemical and Biochemical Engineering
The University of Iowa

II Edizione

Edizione italiana rivista e integrata sulla base di

Scienza ed Ingegneria dei Materiali, IV ed.

a cura di

MP. Pedferri, L. Montanaro

P. Colombo, M.V. Diamanti, C. Siligardi, J. M. C. Tulliani, T. Valente



Titolo originale:

William D. Callister & David G. Rethwisch

Materials Science and Engineering, 10th ed.

Copyright © 2018 John Wiley & Sons, Inc.

Materiali per l'Ingegneria Civile ed Industriale, II ed.

Edizione italiana rivista e integrata sulla base di

Scienza ed Ingegneria dei Materiali, IV ed., EdiSES Edizioni S.r.l.

Copyright © 2015, 2023 EdiSES Edizioni S.r.l. – Napoli

a cura di

MP. Pedferri, L. Montanaro

P. Colombo, M.V. Diamanti, C. Siligardi, J. M. C. Tulliani, T. Valente

9 8 7 6 5 4 3 2 1 0
2027 2026 2025 2024 2023

Le cifre sulla destra indicano il numero e l'anno dell'ultima ristampa effettuata

A norma di legge è vietata la riproduzione, anche parziale, del presente volume di parte di esso con qualsiasi mezzo.

L'Editore

L'Editore ha effettuato quanto in suo potere per richiedere il permesso di riproduzione del materiale di cui non è titolare del copyright e resta comunque a disposizione di tutti gli aventi diritto.

Fotocomposizione

Fotocomposizione TPM S.a.s. – Città di Castello (PG)

Fotoincisione e stampa

PrintSprint S.r.l – Napoli

per conto della

EdiSES Edizioni s.r.l. – Piazza Dante, 89 – Napoli

www.edisesuniversita.it

assistenza.edises.it

ISBN 9788836231287

I curatori, l'editore e tutti coloro in qualche modo coinvolti nella preparazione o pubblicazione di quest'opera hanno posto il massimo impegno per garantire che le informazioni ivi contenute siano corrette, compatibilmente con le conoscenze disponibili al momento della stampa; essi, tuttavia, non possono essere ritenuti responsabili dei risultati dell'utilizzo di tali informazioni e restano a disposizione per integrare la citazione delle fonti, qualora incompleta o imprecisa. Realizzare un libro è un'operazione complessa e, nonostante la cura e l'attenzione poste dagli autori e da tutti gli addetti coinvolti nella lavorazione dei testi, l'esperienza ci insegna che è praticamente impossibile pubblicare un volume privo di imprecisioni. Saremo grati ai lettori che vorranno inviarci le loro segnalazioni e/o suggerimenti migliorativi sulla piattaforma assistenza.edises.it

Autori

Edizione italiana a cura di:

Paolo Colombo *Università di Padova*

Maria Vittoria Diamanti *Politecnico di Milano*

Laura Montanaro *Politecnico di Torino*

MariaPia Pedefterri *Politecnico di Milano*

Cristina Siligardi *Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia*

Jean Marc Christian Tulliani *Politecnico di Torino*

Teodoro Valente *Università degli Studi di Roma “La Sapienza”*

Revisione e coordinamento:

MariaPia Pedefterri *Politecnico di Milano*

Laura Montanaro *Politecnico di Torino*

Alla precedente edizione ha collaborato:

Tiziano Manfredini *Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia*



Prefazione

Oggiorno, la conoscenza dei materiali è competenza irrinunciabile nel bagaglio culturale di un ingegnere, in quanto i materiali abilitano e permeano sostanzialmente tutte le tecnologie attuali. Questo libro vuole dare un contributo allo sviluppo di tale conoscenza, prefissandosi alcuni obiettivi contenutistici e metodologici che accompagnino l'ingegnere nella sua crescita culturale scientifica e tecnologica.

Il primo e primario obiettivo di questo libro è quello di trattare le basi fondamentali della materia a un livello adeguato agli studenti universitari che hanno già affrontato gli insegnamenti di base di matematica, chimica e fisica. A questo scopo, è stata usata una terminologia che sia familiare agli studenti che per la prima volta entrano in contatto con la disciplina di scienza e ingegneria dei materiali e sono stati definiti e spiegati tutti i termini non familiari.

Il secondo obiettivo è quello di presentare la materia in un ordine logico, dai concetti più semplici a quelli più complessi. Ogni capitolo, infatti, è costruito sulla base del contenuto dei precedenti.

Il terzo obiettivo riguarda la filosofia, che si è cercato di mantenere in tutto il testo: se bisogna trattare un argomento o un concetto, lo si deve trattare con un dettaglio tale che gli studenti abbiano l'opportunità di capirlo completamente, senza dover consultare altre fonti; a ciò si aggiunge che, per la maggior parte degli argomenti trattati, vengono citate applicazioni pratiche. La trattazione è condotta in modo chiaro e conciso per consentire un livello di comprensione appropriato.

Il quarto obiettivo è quello di inserire nel testo elementi volti ad agevolare il processo di apprendimento. Tali ausili didattici includono:

- Numerose illustrazioni a colori e fotografie, che aiutano a visualizzare gli argomenti trattati.
- Obiettivi di apprendimento, che focalizzano l'attenzione degli studenti su ciò che si dovrebbe apprendere studiando il capitolo.
- Inserti “Perché studiare...” e “Argomenti di approfondimento”, che mettono in risalto discussioni cruciali.
- Domande di “Verifica dei concetti”, che permettono agli studenti di verificare la propria comprensione degli argomenti studiati a un livello concettuale.
- Termini chiave e descrizioni delle equazioni evidenziati a margine per un riferimento immediato.
- Domande e problemi di fine capitolo, ideati in modo tale da far progressivamente sviluppare agli studenti la comprensione dei concetti e la familiarità con le tecniche.
- Risposte a problemi scelti, in modo che gli studenti possano controllare le proprie risposte.
- Glossario, lista dei simboli e bibliografia, che facilitano la comprensione degli argomenti trattati.

Il quinto obiettivo è quello di migliorare sia il processo di insegnamento che quello di apprendimento mediante l'uso delle più recenti tecnologie attualmente a disposizione della maggior parte dei docenti e degli studenti di ingegneria.

Uno degli strumenti didattici è uno schema delle interrelazioni tra lavorazione, struttura, proprietà e prestazioni per materiali differenti. La presentazione di una “cronologia per argomento” indica le posizioni (per sezione) in cui sono presenti discussioni che riguardano lavorazione, struttura, proprietà e prestazioni di ciascuno di questi tipi di materiali. Tali discussioni sono introdotte nelle sezioni “Perché studiare...” di determinati capitoli e anche in schemi nei sommari di fine capitolo.

Gli autori W.D. Callister e D.G. Rethwisch hanno via via arricchito il libro con una revisione attenta e mirata dei contenuti, mantenendo però la forte impronta didascalica rivolta agli studenti universitari che affrontano per la prima volta lo studio dei fondamenti della scienza, della tecnologia e dell’ingegneria dei materiali.

La trattazione segue fedelmente l’impronta originale degli Autori, dedicando attenzione particolare a evidenziare e valorizzare la stretta correlazione esistente tra la struttura dei materiali, ai vari livelli di scala dimensionale, le tecniche di trasformazione e lavorazione dei componenti, le loro proprietà e prestazioni in esercizio, per fornire all’ingegnere quei fondamentali strumenti di conoscenza e comprensione della natura e del comportamento dei materiali indispensabili per una selezione, una progettazione e un utilizzo consapevoli, efficaci e sostenibili.

La versione proposta vede tuttavia snellita la trattazione di alcuni aspetti, più teorici e fondamentali, lasciando a docenti e studenti la scelta, di volta in volta, di compiere il corrispondente percorso di approfondimento facendo riferimento ai molti testi che trattano esaustivamente questi temi.

D’altro canto, questa edizione si è invece posta l’obiettivo di argomentare, con accresciuta sistematicità e dovizia di riferimenti, le applicazioni ingegneristiche correnti delle varie categorie di materiali, particolarmente soffermandosi sul loro impiego nel mondo delle costruzioni e dell’ingegneria industriale.

Il testo originale adattato a cura di MariaPia Pedeferri e Laura Montanaro, con il contributo di Paolo Colombo, Maria Vittoria Diamanti, Tiziano Manfredini e Teodoro Valente, è arricchito da nuovi capitoli dedicati a materiali di interesse per l’Ingegneria Civile ed Industriale: il Capitolo 10 su leganti, calcestruzzo e malte curato da Laura Montanaro, il Capitolo 12 sul vetro curato da Paolo Colombo, il Capitolo 13 sul legno curato da Maria Vittoria Diamanti.

Materiale di supporto per i docenti

I docenti che utilizzano il testo a scopo didattico possono scaricare dal sito www.edises.it, previa registrazione all’area docenti, le immagini del libro in formato Power-Point.

Indice generale

1 INTRODUZIONE	1
1.1 Prospettiva storica	2
1.2 Scienza e ingegneria dei materiali	2
1.3 Perché studiare la scienza e l'ingegneria dei materiali?	4
1.4 Classificazione dei materiali	5
1.5 Materiali avanzati	10
1.6 Esigenze di materiali moderni	12
1.7 Correlazioni fra lavorazione/struttura/proprietà/prestazioni	13
Sommario	14
Bibliografia	15
Domande e problemi	16
2 STRUTTURA ATOMICA, LEGAMI INTERATOMICI, SOLIDI CRISTALLINI, IMPERFEZIONI	17
2.1 Introduzione	19
<i>Struttura atomica</i>	20
2.2 Concetti fondamentali	20
2.3 La tavola periodica	21
<i>Legami atomici nei solidi</i>	22
2.4 Legami interatomici primari	22
2.5 Legami secondari o legami di van der Waals	26
<i>Strutture cristalline</i>	26
2.6 Concetti fondamentali	26
2.7 Celle unitarie	28
2.8 Strutture cristalline dei metalli	28
2.9 Calcolo della densità teorica	32
2.10 Polimorfismo e allotropia	33
2.11 Sistemi cristallini	33
2.12 Piani cristallografici e densità planare	36
2.13 Strutture cristalline compatte	37
<i>Materiali cristallini e non cristallini</i>	38
2.14 Monocristalli	38
2.15 Materiali policristallini	39
2.16 Anisotropia	39
2.17 Solidi non cristallini	41
<i>Difetti puntuali</i>	42
2.18 Vacanze e autointerstiziali	42
2.19 Impurezze nei solidi	43

VIII • Indice generale

<i>Imperfezioni miste</i>	44
2.20 Dislocazioni–difetti lineari	44
2.21 Difetti di superficie	48
2.22 Difetti di massa o di volume	50
2.23 Determinazione della dimensione dei grani	50
2.24 La diffusione allo stato solido	52
2.25 Diffusione stazionaria	54
2.26 Diffusione non stazionaria	56
2.27 Fattori che influenzano la diffusione	56
Sommario	57
Bibliografia	64
Domande e problemi	64
3 PROPRIETÀ MECCANICHE DEI METALLI	68
3.1 Introduzione	69
3.2 Concetti di sforzo e di deformazione	70
<i>Deformazione elastica</i>	74
3.3 Comportamento sforzo-deformazione	74
3.4 Anelasticità	76
3.5 Proprietà elastiche dei materiali	77
<i>Deformazione plastica</i>	79
3.6 Proprietà a trazione	79
3.7 Sforzo e deformazione reali	87
3.8 Recupero elastico dopo deformazione plastica	89
3.9 Deformazione a compressione, a taglio e a torsione	89
3.10 Durezza	90
<i>Variabilità delle proprietà e dei fattori di progettazione e di sicurezza</i>	96
3.11 Variabilità delle proprietà dei materiali	96
3.12 Fattori di progetto e di sicurezza	98
Sommario	100
Bibliografia	104
Domande e problemi	104
Problemi di progettazione	110
4 DISLOCAZIONI E MECCANISMI PER AUMENTARE LA RESISTENZA	111
4.1 Introduzione	112
<i>Dislocazioni e deformazione plastica</i>	113
4.2 Concetti di base	113
4.3 Caratteristiche delle dislocazioni	115
4.4 Sistemi di scorrimento	116
4.5 Deformazione plastica dei materiali policristallini	117
4.6 Deformazione per geminazione	118
<i>Meccanismi di rafforzamento nei metalli</i>	120
4.7 Rafforzamento per riduzione della dimensione del grano	120
4.8 Rafforzamento per soluzione solida	122
4.9 Incrudimento	123

Recovery, ricristallizzazione e accrescimento del grano	126
4.10 Recovery	127
4.11 Ricristallizzazione	127
4.12 Crescita del grano	131
Sommario	133
Bibliografia	136
Domande e problemi	136
Problemi di progettazione	138
5 LA ROTTURA	139
5.1 Introduzione	140
Frattura	141
5.2 Fondamenti della frattura	141
5.3 Frattura duttile	141
5.4 Frattura fragile	143
5.5 Principi di meccanica della frattura	145
5.6 Valutazione della tenacità a frattura	154
Fatica	158
5.7 Sforzi ciclici	158
5.8 La curva S-N	160
5.9 Innesco e propagazione della cricca	162
5.10 Fattori che influiscono sulla vita a fatica	164
5.11 Effetti ambientali	167
Scorrimento a caldo o creep	167
1.12 Comportamento a creep	168
1.13 Effetti dello sforzo e della temperatura	169
1.14 Metodi di estrapolazione dei dati	171
1.15 Leghe per impieghi ad alta temperatura	172
Sommario	173
Bibliografia	177
Domande e problemi	177
Problemi di progettazione	181
6 PROPRIETÀ ELETTRICHE, MECCANICHE E OTTICHE	182
6.1 Introduzione	183
Proprietà elettriche	184
6.2 Conduzione elettrica	184
6.3 La legge di Ohm	184
6.4 Conducibilità elettrica	185
6.5 Resistività elettrica dei metalli	186
6.6 Caratteristiche elettriche delle leghe commerciali	188
Semiconduttore	189
6.7 Semiconduttore intrinseca	189
6.8 Semiconduttore estrinseca	189
Conduzione elettrica nei ceramici ionici e nei polimeri	190
6.9 Concetti di base	190
Comportamento dielettrico	191
6.10 Capacità	191
6.11 Rigidità dielettrica	192
6.12 Materiali dielettrici	193

X • Indice generale

<i>Altre caratteristiche elettriche dei materiali</i>	193
6.13 Ferroelettricità	193
6.14 Piezoelettricità	194
<i>Proprietà termiche</i>	194
6.15 Capacità termica	194
6.16 Espansione termica	195
6.17 Conducibilità termica	198
6.18 Tensioni termiche	201
<i>Proprietà ottiche</i>	203
6.19 Concetti di base	203
6.20 Radiazioni elettromagnetiche	203
6.21 Interazione della luce con i solidi	205
<i>Proprietà ottiche dei metalli</i>	205
6.22 Concetti di base	205
<i>Proprietà ottiche dei non metalli</i>	206
6.23 Rifrazione e riflessione	206
6.24 Colore	209
6.25 Opacità e traslucenza negli isolanti	210
Sommario	212
Bibliografia	217
Domande e problemi	218
Problemi di progettazione	221

7 SOLIDIFICAZIONE E TRASFORMAZIONI ALLO STATO SOLIDO	222
7.1 Introduzione	224
7.2 Definizioni e concetti di base	224
7.3 Limite di solubilità	224
7.4 Fasi	225
7.5 Microstruttura	226
7.6 Equilibri di fase e diagrammi di fase	226
7.7 Sistemi binari isomorfi	227
7.8 Interpretazione dei diagrammi di fase	228
7.9 Evoluzione della microstruttura nelle leghe isomorfe	230
7.10 Proprietà meccaniche delle leghe isomorfe	234
7.11 Sistemi binari eutettici	234
7.12 Evoluzione della microstruttura nelle leghe eutettiche	240
7.13 Reazioni eutettoidi e peritettiche	245
<i>Il sistema ferro-carbonio</i>	246
7.14 Il diagramma di fase ferro–carburo di ferro ($\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$)	246
7.15 Evoluzione della microstruttura nelle leghe ferro–carbonio	249
7.16 L'influenza di altri elementi di lega	256
<i>Trasformazioni di fase</i>	257
7.17 Concetti di base	257
7.18 La cinetica delle trasformazioni di fase	257
<i>Variazioni della microstruttura e delle proprietà nelle leghe ferro–carbonio</i>	258
7.19 Diagrammi di trasformazione isotermica	259

7.20 Diagrammi di trasformazione in raffreddamento continuo	268
7.21 Comportamento meccanico delle leghe ferro-carbonio	271
7.22 Martensite rinvenuta	274
7.23 Riepilogo delle trasformazioni di fase e delle proprietà meccaniche per le leghe ferro-carbonio	277
Sommario	278
Bibliografia	283
Domande e problemi	284
Problemi di progettazione	291
8 MATERIALI METALLICI	292
8.1 Introduzione	293
<i>Tipi di leghe metalliche</i>	294
8.2 Leghe ferrose	294
8.3 Leghe non ferrose	308
<i>Lavorazione dei metalli</i>	318
8.4 Operazioni di formatura	319
8.5 Fusione	320
8.6 Altre tecniche	322
8.7 Stampa 3D	324
<i>Trattamento termico dei metalli</i>	327
8.8 Processi di ricottura	328
8.9 Trattamenti termici degli acciai	330
8.10 Indurimento per precipitazione	341
Sommario	346
Bibliografia	351
Domande e problemi	351
Problemi di progettazione	353
9 CORROSIONE DEI MATERIALI METALLICI	355
9.1 Introduzione	356
9.2 Considerazioni elettrochimiche	357
9.3 Velocità di corrosione	363
9.4 Previsione della velocità di corrosione	364
9.5 Passività	369
9.7 Forme di corrosione	370
9.8 Fattori che influenzano la resistenza a corrosione e ambienti corrosivi	378
9.9 Prevenzione della corrosione	380
Sommario	382
Bibliografia	385
Domande e problemi	385
Problemi di progettazione	388
10 LEGANTI, MALTE E CALCESTRUZZO	389
a cura di L. Montanaro	
10.1 Introduzione	390
<i>Tipi di leganti</i>	391
10.2 Leganti aerei	391

XII • Indice generale

10.3 Leganti idraulici	394
10.4 Durabilità di calcestruzzi e malte	411
10.5 Calcestruzzi speciali	420
10.6 Riduzione dell'impatto ambientale	424
Sommario	425
Bibliografia	427
Domande e problemi	427

11 MATERIALI CERAMICI 429

11.1 Introduzione	430
<i>Struttura dei ceramici</i>	431
11.2 Strutture cristalline	432
11.3 Ceramici formati da silicati	441
11.4 Carbonio	445
11.5 Imperfezioni nei ceramici	449
11.6 Diffusione nei materiali ionici	453
11.7 Diagrammi di fase dei ceramici	453
<i>Proprietà meccaniche</i>	456
11.8 Frattura fragile dei ceramici	457
11.9 Comportamento sforzo-deformazione	461
11.10 Meccanismi di deformazione plastica	463
11.11 Considerazioni meccaniche varie	464
<i>Tipi e applicazioni dei ceramici</i>	467
11.12 Vetro-ceramici	467
11.13 Prodotti argillosi	468
11.14 Refrattari	470
11.15 Abrasivi	472
11.16 Ceramici avanzati	473
<i>Fabbricazione e lavorazione dei ceramici</i>	477
11.17 Fabbricazione e lavorazione dei prodotti argillosi	478
11.18 Tecniche di fabbricazione	479
Sommario	485
Bibliografia	490
Domande e problemi	491
Problemi di progettazione	495

12 VETRI 496 a cura di P. Colombo

12.1 Introduzione	497
12.2 Proprietà del vetro	499
12.3 Fabbricazione del vetro	504
12.4 Principali prodotti vetrari per l'edilizia	507
12.5 Altri prodotti vetrari utilizzati in edilizia	517
Sommario	520
Bibliografia	521
Domande e problemi	521
Problemi di progettazione	522

13 IL LEGNO	523
a cura di M.V. Diamanti	
13.1 Introduzione	524
13.2 Struttura del legno	526
13.3 Caratteristiche	531
13.4 Degrado	542
13.5 Produzione del legno e dei suoi derivati	547
Sommario	553
Bibliografia	556
Domande e problemi	556
14 POLIMERI	558
14.1 Introduzione	560
14.2 Molecole idrocarburiche	560
14.3 Molecole polimeriche	560
14.4 Chimica delle molecole polimeriche	561
14.5 Peso molecolare	564
14.6 Struttura molecolare	566
14.7 Configurazioni molecolari	567
14.8 Polimeri termoplastici e termoindurenti	569
14.9 Copolimeri	569
14.10 Cristallinità dei polimeri	570
<i>Comportamento meccanico dei polimeri</i>	572
14.11 Comportamento sforzo-deformazione	572
14.12 Deformazione macroscopic	575
14.13 Deformazione viscoelastica	575
14.14 Frattura dei polimeri	577
14.15 Altre proprietà meccaniche	580
<i>Meccanismi di deformazione e di rafforzamento dei polimeri</i>	581
14.16 Deformazione dei polimeri semicristallini	581
14.17 Fattori che influenzano le proprietà meccaniche dei polimeri semicristallini	583
14.18 Deformazione degli elastomeri	583
<i>Fenomeni di cristallizzazione, fusione e transizione vetrosa nei polimeri</i>	584
14.19 Fusione	585
<i>Tipi di polimeri</i>	587
14.20 Plastiche	587
14.21 Elastomeri	589
14.22 Applicazioni varie	591
<i>Sintesi e lavorazione dei polimeri</i>	592
14.23 Polimerizzazione	593
14.24 Tecniche di formatura delle plastiche	594
14.25 Produzione di fibre e film	596
14.26 Stampa 3D dei polimeri	597
Sommario	600
Bibliografia	605
Domande e problemi	605

XIV • Indice generale

15 COMPOSITI	608
15.1 Introduzione	609
Compositi rinforzati con particelle	611
15.2 Compositi rinforzati con particelle di grandi dimensioni	612
15.3 Compositi rinforzati con particelle disperse	614
Compositi fibro-rinforzati	616
15.4 Influenza della lunghezza delle fibre	617
15.5 Influenza dell'orientazione e della concentrazione delle fibre	618
15.6 La fase fibre	624
15.7 La fase matrice	625
15.8 Compositi a matrice polimerica	625
15.9 Compositi a matrice metallica	629
15.10 Compositi a matrice ceramica	630
15.11 Compositi carbonio–carbonio	632
15.12 Compositi ibridi	633
15.13 Lavorazione dei compositi fibro-rinforzati	633
Compositi strutturali	636
15.14 Compositi laminati	636
15.15 Pannelli sandwich	638
15.16 L'esempio del boeing 787 dreamliner	639
Sommario	641
Bibliografia	644
Domande e problemi	645
Problemi di progettazione	646
Appendice A Sistema internazionale di unità di misura (SI)	A1
Appendice B Proprietà di alcuni materiali ingegneristici	A3
B.1 Densità	A3
B.2 Modulo elastico	A6
B.3 Rapporto di Poisson	A10
B.4 Resistenza e duttilità	A11
B.5 Tenacità a frattura in condizioni di deformazione piana	A16
B.6 Coefficiente lineare di espansione termica	A17
B.7 Conducibilità termica	A20
B.8 Calore specifico	A23
B.9 Resistività elettrica	A26
B.10 Composizioni delle leghe metalliche	A29
Appendice C Strutture delle unità ripetitive di polimeri comuni	A31
Appendice D Temperature di transizione vetrosa e di fusione di materiali polimerici comuni	A35
GLOSSARIO	G1
RISPOSTE A PROBLEMI SCELTI	R1
INDICE ANALITICO	I1

Elenco dei simboli

a = parametro reticolare: lunghezza dello spigolo lungo l'asse x della cella unitaria	e^- = elettrone
a = anghezza di una cricca superficiale	\mathcal{E} = intensità del campo elettrico
A = area	E = energia
\AA = angstrom	E = modulo elastico o di Young
$A\%$ = duttilità, come allungamento percentuale	E_f = energia di Fermi
A_i = peso atomico dell'elemento i	E_g = energia della banda di separazione
$\%at$ = percentuale atomica	$E_r(t)$ = modulo di rilassamento
b = parametro reticolare: lunghezza dello spigolo lungo l'asse y della cella unitaria	erf = funzione di errore gaussiana
b = vettore di Burgers	$es.c$ = struttura cristallina esagonale compatta
c = parametro reticolare: lunghezza dello spigolo lungo l'asse z della cella unitaria	$\exp = e$, la base dei logaritmi naturali
c = velocità delle radiazioni elettromagnetiche nel vuoto	F = forza, interatomica o meccanica
C = capacità	\mathcal{F} = costante di Faraday
C_i = concentrazione (composizione) della componente i in % in peso	FIA = fattore di impaccamento atomico
C'_i = concentrazione (composizione) della componente i in % atomica	G = modulo di taglio
C_v, C_p = capacità termica a volume costante e a pressione costante	h = costante di Planck
ccc = struttura cristallina cubica a corpo centrale	H = resistenza del campo magnetico
cfc = struttura cristallina cubica a facce centrali	HB = durezza Brinell
CVN = Charpy con intaglio a V	HK = durezza Knoop
d = diametro	(hkl) = indici di Miller per un piano cristallografico
d = diametro medio del grano	HRB, HRF = durezza Rockwell: scale B e F
D = coefficiente di diffusione	HR15N, HR45W = durezza Rockwell superficiale: scale 15N e 45W
D = spostamento dielettrico	HV = durezza Vickers
d_{hkl} = distanza interplanare per piani con indici di Miller h, k e l	i = densità di corrente
DP = grado di polimerizzazione	I = corrente elettrica
e = carica elettrica per elettrone	I = intensità della radiazione elettromagnetica
	i_c = densità di corrente di corrosione
	J = flusso di diffusione
	J = densità di corrente elettrica
	k = costante di Boltzmann
	k = conducibilità termica
	K_c = tenacità a frattura

XVI • Elenco dei simboli

K_{Ic}	= tenacità a frattura in condizioni di deformazione piana per apertura della cricca secondo il modo I	$S\%$	= duttilità, come riduzione per-centuale della sezione
l	= lunghezza	SEM	= microscopia elettronica (o microscopio elettronico) a scansione
l_c	= lunghezza critica della fibra	t	= tempo
LF%	= percentuale di lavorazione a freddo	T	= temperatura
\ln	= logaritmo naturale	T_f	= temperatura di fusione
\log	= logaritmo in base 10	T_g	= temperatura di transizione vetrosa
\overline{M}_n	= peso molecolare medio numerico di un polimero	t_r	= tempo di vita a rottura numerico di un polimero
\overline{M}_w	= peso molecolare medio ponde- rale di un polimero	TEM	= microscopia elettronica (o microscopio elettronico) a trasmissione
mol%	= percentuale molare	U_r	= modulo di resilienza
n	= numero quantico principale	$[uvw]$	= indici per una direzione cristallografica
n	= numero di atomi per cella unitaria	v	= velocità
n	= esponente di incrudimento	V	= differenza di potenziale elettrico (voltaggio)
n	= numero di elettroni in una reazione elettrochimica	V_C	= volume della cella unitaria
n	= numero di elettroni di conduzione per metro cubo	V_C	= potenziale di corrosione
n	= indice di rifrazione	V_H	= tensione di Hall
n'	= per i ceramici, il numero di unità formula per cella unitaria	V_i	= frazione di volume della fase i
N	= numero di cicli di fatica	%vol	= percentuale in volume
N_A	= numero di Avogadro	VPC	= velocità di penetrazione di corrosione
N_f	= vita a fatica	W_i	= frazione di massa della fase i
n_i	= concentrazione intrinseca dei portatori di carica (elettroni e lacune)	x	= lunghezza
p	= numero di lacune per metro cubo	x	= coordinata spaziale
P	= polarizzazione dielettrica	y	= coordinata spaziale
% peso	= percentuale in peso	Y	= parametro o funzione adimensionale nell'espressione della tenacità alla frattura
Q	= energia di attivazione	z	= coordinata spaziale
Q	= quantità di carica immagazzinata	α	= parametro reticolare: angolo fra gli assi $y-z$ della cella unitaria
r	= distanza interatomica	α, β, γ	= designazioni di fasi
r	= velocità di reazione	α_l	= coefficiente lineare di espansione termica
R	= raggio atomico	β	= parametro reticolare: angolo fra gli assi $x-z$ della cella unitaria
R	= costante dei gas	γ	= parametro reticolare: angolo fra gli assi $x-y$ della cella unitaria
r_A, r_C	= raggi ionici dei cationi e degli anioni	γ	= deformazione di taglio
rappporto P-B	= rapporto Pilling–Bedworth	Δ	= variazione finita del parametro scritto di seguito
S	= ampiezza di sforzo	ϵ	= deformazione nominale
		ϵ	= permittività dielettrica
		ϵ_r	= costante dielettrica o permittività relativa

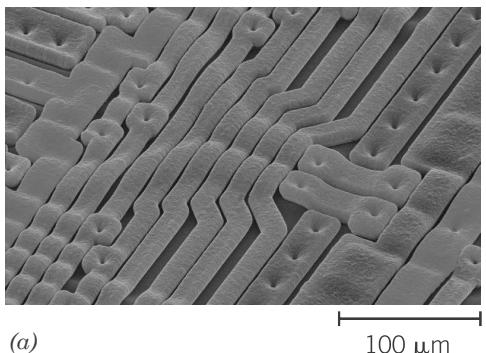
$\dot{\epsilon}_s$ = velocità di creep stazionario
 ϵ_T = deformazione reale
 η = viscosità
 η = sovratensione
 θ = angolo di diffrazione di Bragg
 θ_D = temperatura di Debye
 λ = lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica
 μ_e = mobilità degli elettroni
 μ_h = mobilità delle lacune
 ν = rapporto di Poisson
 ν = frequenza della radiazione elettromagnetica
 ρ = densità
 ρ = resistività elettrica
 ρ_t = raggio di curvatura all'apice della cricca
 σ = sforzo nominale, di trazione o di compressione
 σ = conducibilità elettrica
 σ^* = resistenza a trazione della fibra (composito)
 σ_c = sforzo critico per la propagazione di una cricca
 σ_{fs} = resistenza a flessione
 σ_m = sforzo massimo
 σ_m' = sforzo medio
 σ'_m = sollecitazione sulla matrice corrispondente alla rottura del composito
 σ_R = resistenza a rottura
 σ_s = limite di snervamento

σ_T = sforzo reale
 σ_w = sforzo di sicurezza o di lavoro
 τ = sforzo di taglio
 τ_c = forza di legame all'interfaccia fibra-matrice o resistenza allo snervamento di taglio della matrice
 τ_{stic} = sforzo di taglio indotto critico

PEDICI

c = composito
 cd = composito a fibre discontinue
 cl = direzione longitudinale (composito fibroso allineato)
 ct = direzione trasversale (composito fibroso allineato)
 f = finale
 f = alla frattura
 f = fibra
 i = istantaneo
 m = matrice
 m, \max = massimo
 \min = minimo
 0 = originale
 0 = all'equilibrio
 0 = nel vuoto

Capitolo 6 Proprietà elettriche, termiche e ottiche



(a)

100 μm



(b)

I funzionamento delle moderne schede di memoria portatili (flash memory card) e stick, utilizzate per memorizzare le informazioni digitali, si basa sulle proprietà elettriche inedite del silicio, un materiale semiconduttore.

(a) Micrografia elettronica a scansione di un circuito integrato, composto da silicio e interconnessioni metalliche. I circuiti integrati sono utilizzati per memorizzare informazioni in un formato digitale. (b) Diversi tipi di memorie portatili. (Chip di silicio EPROM, Andrew Syred/Photo Researcher, Inc.; schede di memoria portatili per gentile concessione di SanDisk Corporation)



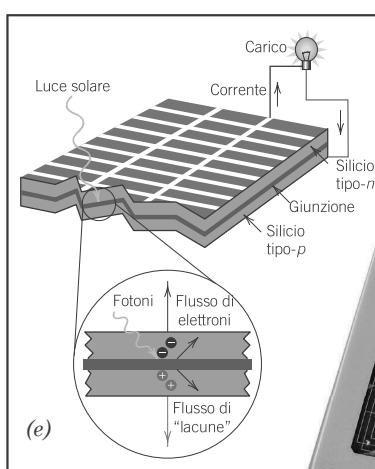
(c)

Un tipo di termostato utilizza il fenomeno dell'espansione termica (l'allungamento che subisce un materiale quando viene scaldato). Il cuore di questo termostato è una lamina bimetallica. Quando il metallo è riscaldato la lamina si flette per effetto della variazione di temperatura. In questi termostati, la lamina bimetallica assume la forma di una bobina o una spirale per consentire una maggiore deflessione per una data variazione di temperatura e, quindi, una maggiore accuratezza. [Fotografia (c) da iStockphoto.]



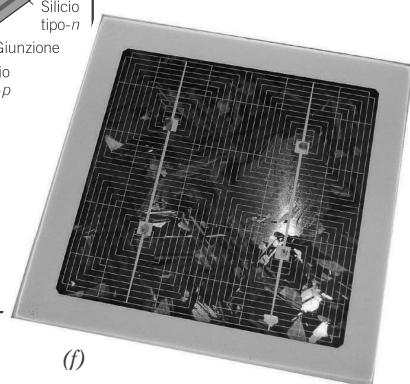
(d)

La fotografia di Figura (d) mostra le conseguenze di una cocente ondata di caldo verificatasi a Melbourne, Australia: i binari ferroviari si sono inarcati come risultato delle tensioni indotte da una inaspettata espansione termica. [Figura (d) gentilmente concessa da Calum Robertson/Newspix.]



(e)

(e) Schema di funzionamento di una cella solare fotovoltaica. La cella è costituita da silicio policristallino che è stato ottenuto in modo da formare una giunzione $p-n$. I fotoni della luce solare eccitano gli elettroni nella banda di conduzione dal lato n della giunzione e creano delle lacune nel lato p . Questi elettroni e queste lacune si muovono in direzioni opposte allontanandosi dalla giunzione e producendo una corrente elettrica esterna. [(e) Per gentile concessione del Research Institute for Sustainable Energy (www.rise.org.au) e della Murdoch University. (f) Tratta da <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:4inch-poly-solar-cell.jpg>.]



(f)

PERCHÉ STUDIARE *le proprietà elettriche, termiche e ottiche dei materiali*

In fase di progettazione di un componente o di una struttura è spesso importante prendere in considerazione le proprietà elettriche, termiche e ottiche che si ritengono più idonee, al fine di scegliere il materiale più appropriato.

Per esempio, quando si assembla un circuito integrato, si devono collegare vari materiali con proprietà diverse: alcuni devono essere altamente conduttori (per esempio i cavi di connessione), altri devono essere buoni isolanti elettrici (per esempio l'incapsulamento protettivo del circuito).

Per applicazioni che prevedano sollecitazioni termiche studiare le proprietà termiche è fondamentale al fine di caratterizzarne il comportamento in funzione della temperatura. A esempio tra i materiali i ceramici sono quelli più suscettibili a rottura fragile da shock

termico dovuto a tensioni che si vengono a creare all'interno del materiale a seguito di rapide variazioni di temperatura (in genere durante il raffreddamento).

Lo shock termico è normalmente un evento indesiderato e la suscettibilità di un materiale ceramico a questo fenomeno dipende dalle sue proprietà termiche e meccaniche (coefficiente di espansione termica, conducibilità termica, modulo di elasticità e resistenza a frattura).

Nel caso che un materiale venga colpito da una radiazione elettromagnetica, si deve essere in grado di prevedere e modificare la sua reazione. Questo è possibile solo se si ha familiarità con le proprietà ottiche dei materiali e si conoscono i meccanismi di base dei loro comportamenti ottici.

Obiettivi di apprendimento

Dopo aver studiato questo capitolo, si dovrebbe essere in grado di fare le seguenti cose:

Proprietà elettriche

1. Descrivere le quattro possibili strutture a bande elettroniche presenti nei solidi.
3. Calcolare le conducibilità elettriche dei materiali.
4. Calcolare la capacità di un condensatore a piastre parallele.
5. Definire la costante dielettrica in termini di permittività.
6. Descrivere brevemente i fenomeni della ferro-elettricità e della piezoelettricità.

Proprietà termiche

7. Definire la capacità termica e il calore specifico.
8. Descrivere il principale meccanismo con cui i materiali solidi assorbono energia termica.
9. Determinare il coefficiente di espansione termica lineare in base alla variazione di lunghezza dovuta a un determinato cambiamento di temperatura.

10. Definire la conducibilità termica.

11. Descrivere i due principali meccanismi di conduzione nei solidi e confrontare i valori dei rispettivi contributi alla conduzione termica per i metalli, i ceramici e i polimeri.

Proprietà ottiche

12. Spiegare brevemente perché i materiali metallici sono opachi alla luce visibile.
13. Definire l'indice di rifrazione.
14. Descrivere il meccanismo di assorbimento di fotoni per (a) isolanti di elevata purezza e semiconduttori e (b) isolanti e semiconduttori che contengono difetti elettricamente attivi.
15. Per i materiali dielettrici intrinsecamente trasparenti, indicare tre sorgenti di diffusione interna che possono portare all'opacità e alla traslucenza.

6.1 INTRODUZIONE

Obiettivo di questo capitolo è quello di esplorare e presentare le proprietà elettriche, termiche e ottiche dei materiali, ovvero il comportamento di materiali diversi quando sono rispettivamente sottoposti a un campo elettrico applicato dall'esterno, sollecitati mediante somministrazione di calore, o esposti alle radiazioni elettromagnetiche e, in particolare, alla luce visibile.

Per le differenti tipologie di sollecitazioni, elettrica, termica e ottica saranno presentati i concetti di base ed i meccanismi coinvolti nonché i parametri che li caratterizzano.

Proprietà elettriche

6.2 CONDUZIONE ELETTRICA

Obiettivo primario di questa prima parte del capitolo è quello di esplorare e presentare le proprietà elettriche dei materiali, ovvero il comportamento di materiali diversi quando vengono sottoposti a un campo elettrico applicato dall'esterno. Si inizia con la descrizione del fenomeno della conduzione elettrica: i parametri con cui è espressa, i meccanismi di conduzione da parte degli elettroni e come la struttura elettronica a bande di un materiale influenzi la capacità di conduzione. In base a questi principi, sarà valutato il comportamento dei materiali conduttori, semiconduttori e isolanti.

6.3 LA LEGGE DI OHM

legge di Ohm

Espressione della legge di Ohm

resistività elettrica

Resistività elettrica
- in funzione della resistenza, dell'area della sezione trasversale del materiale e della distanza tra i punti di misura

Resistività elettrica
- in funzione della tensione applicata, della corrente, dell'area del materiale e della distanza tra i punti di misura

Una delle più importanti caratteristiche elettriche dei materiali solidi è la facilità con cui sono in grado di trasmettere la corrente elettrica. La **legge di Ohm** correla la corrente I – ovvero la velocità con la quale circolano le cariche elettriche – alla tensione applicata, V , come segue:

$$V = IR \quad (6.1)$$

dove R è la resistenza del materiale al passaggio della corrente al suo interno. Le unità di misura di V , I e R sono rispettivamente il volt ($V = J/C$), l'ampere ($A = C/s$) e l'Ohm ($\Omega = V/A$). Il valore di R è influenzato dalla geometria del provino e, per molti materiali, è indipendente dalla corrente. La **resistività elettrica** ρ è indipendente dalla geometria del provino, ma è correlata a R attraverso l'espressione

$$\rho = \frac{RA}{l} \quad (6.2)$$

dove l è la distanza tra i punti rispetto ai quali è misurata la tensione e A è l'area della sezione trasversale disposta perpendicolarmente alla direzione della corrente. L'unità di misura di ρ è l'ohm–metro ($\Omega \cdot m$). Dall'espressione della legge di Ohm e dall'Equazione 6.2,

$$\rho = \frac{VA}{Il} \quad (6.3)$$

In Figura 6.1 è riportato lo schema di un dispositivo sperimentale per la misura della resistività elettrica.

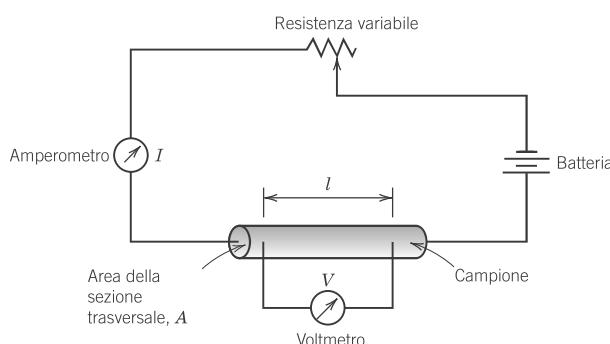


Figura 6.1
Rappresentazione schematica del dispositivo impiegato per misurare la resistività elettrica.

6.4 CONDUCIBILITÀ ELETTRICA

Per definire le caratteristiche elettriche di un determinato materiale spesso si utilizza la **conducibilità elettrica** σ , che è data dal reciproco della resistività, ovvero

Rapporto inverso fra
conducibilità elettrica
e resistività

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (6.4)$$

ed è una grandezza che indica la facilità con la quale un materiale è in grado di condurre la corrente elettrica. Le unità di σ sono il reciproco dell'ohm-metro $[(\Omega \cdot m)^{-1}$, o ohm/m]. Nel seguito si farà riferimento sia alla resistività che alla conducibilità.

Oltre alla forma riportata nell'Equazione 6.1, la legge di Ohm può essere espressa nel seguente modo:

$$J = \sigma \mathcal{E}$$

dove J è la densità di corrente, ovvero la corrente per unità di area I/A , ed \mathcal{E} è l'intensità del campo elettrico, ovvero il rapporto tra la differenza di potenziale presente tra due punti e la distanza che li separa, ovvero

$$\mathcal{E} = \frac{V}{l}$$

Espressione della
legge di Ohm – in
termini della densità
di corrente, della
conducibilità e del
campo elettrico
applicato

Intensità del campo
elettrico

metallo

isolante elettrico

semiconduttore

**livelli elettronici
banda elettronica
di energia**

banda di valenza

I materiali solidi mostrano di possedere valori di conducibilità elettrica molto diversi fra loro e distribuiti su intervalli molto ampi, che arrivano a più di 27 ordini di grandezza; probabilmente non esiste nessuna altra grandezza fisica che presenti una così ampia gamma di variazione. In effetti, una possibile classificazione dei materiali solidi si basa sulla facilità con cui essi conducono la corrente elettrica; con questa classificazione è possibile suddividere i materiali solidi in tre gruppi: *conduttori*, *semiconduttori* e *isolanti*. I **metalli** sono buoni conduttori e presentano conducibilità dell'ordine di $10^7 (\Omega \cdot m)^{-1}$. All'estremo opposto vi sono i materiali con conducibilità molto bassa, compresa tra 10^{-10} e $10^{-20} (\Omega \cdot m)^{-1}$, definiti **isolanti elettrici**. I materiali che presentano conducibilità intermedie fra questi estremi, ovvero comprese tra 10^{-6} e $10^4 (\Omega \cdot m)^{-1}$, sono chiamati **semiconduttori**. Gli intervalli di conducibilità elettrica per i vari materiali sono posti a confronto nel diagramma a barre di Figura 1.7.

In tutti i conduttori, semiconduttori e in molti materiali isolanti esiste solo il meccanismo di conduzione elettronica e, pertanto, l'entità della conducibilità elettrica risultante dipende principalmente dal numero di elettroni in grado di partecipare al processo di conduzione. In ogni atomo sono presenti livelli energetici discreti i quali possono essere occupati dagli elettroni. Un solido può essere visto come un insieme di un grande numero, diciamo N , di atomi, i quali vengono successivamente posti a contatto tra loro fino a formare legami atomici e dare vita a una configurazione atomica ordinata e ripetitiva, quale quella dei solidi cristallini. L'interazione che ne consegue può causare la suddivisione di ciascun livello atomico in una molteplicità di **livelli elettronici** molto ravvicinati fra loro contenuti nel solido creatosi, i quali generano diverse **bande elettroniche di energia**.

Le proprietà elettriche dei solidi derivano dalla loro struttura a bande, ovvero dalla configurazione delle bande elettroniche più esterne e dalla modalità con la quale esse vengono riempite dagli elettroni.

Nella prima (6.2a) la banda elettronica più esterna è soltanto parzialmente riempita dagli elettroni. Questa struttura a bande energetiche è caratteristica di alcuni metalli e in particolare di quelli che hanno un singolo elettrone di valenza nella banda *s* (per esempio il rame).

Nel secondo tipo di struttura a bande (Figura 6.2b), anch'essa tipica dei metalli come per esempio il magnesio, è presente una sovrapposizione tra una banda piena e una vuota.

Le restanti due strutture sono simili; una banda (la **banda di valenza**) è completamente riempita dagli elettroni ed è separata da un'altra banda vuota chiamata

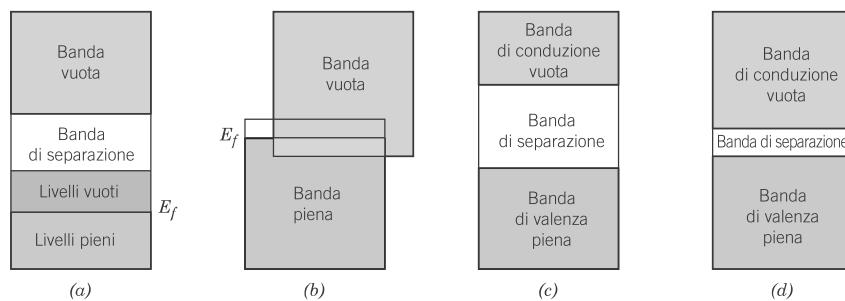


Figura 6.2 Possibili strutture elettroniche a bande presenti nei solidi a 0 K. (a) Struttura a bande elettroniche presente in metalli quali il rame, nei quali ci sono livelli elettronici disponibili al di sopra e adiacenti ai livelli pieni, nella stessa banda. (b) Struttura elettronica di metalli quali il magnesio, in cui è presente sovrapposizione tra bande vuote e piene. (c) Struttura elettronica caratteristica degli isolanti; la banda di valenza piena è separata dalla banda di conduzione vuota da una banda relativamente larga (> 2 eV). (d) Struttura elettronica tipica dei semiconduttori, che è la medesima degli isolanti tranne per il fatto che il gap energetico è di minore entità (< 2 eV).

banda di conduzione

banda di conduzione. Tra le due bande è presente una **banda energetica di separazione**. Nel caso di materiali molto puri, agli elettroni non è consentito assumere livelli energetici contenuti in questa banda proibita. La principale differenza tra queste due strutture è nell'ampiezza del valore della banda di separazione: per gli isolanti è abbastanza ampia (Figura 6.2c), mentre per i semiconduttori è abbastanza stretta (Figura 6.2d).

banda energetica di separazione

6.5 RESISTIVITÀ ELETTRICA DEI METALLI

La maggior parte dei metalli sono ottimi conduttori di elettricità; le conducibilità a temperatura ambiente sono riportate in Tabella 6.1 (la Tabella B.9 in Appendice B elenca le resistività elettriche di numerosi metalli e leghe). Va detto ancora una volta che i metalli presentano elevate conducibilità a causa del gran numero di elettroni liberi che possono essere eccitati.

A questo punto è opportuno discutere della conduzione nei metalli in termini di resistività, cioè del reciproco della conducibilità; la ragione di tale cambiamento apparirà evidente nel prosieguo della trattazione.

Poiché nei metalli le imperfezioni della struttura cristallina si comportano come punti di scattering (deviazione) per gli elettroni di conduzione, ne consegue che all'aumentare del numero di difetti, cresce la resistività (ovvero diminuisce la conducibilità). La concentrazione di questi difetti dipende dalla temperatura, dalla composizione e dal grado di lavorazione a freddo di un metallo. In effetti è stato osservato sperimentalmente che la resistività totale di un metallo è data dalla somma dei singoli contributi derivanti dalle vibrazioni termiche, dalla presenza di impurità e dal grado di deformazione plastica subito; ciò significa che i meccanismi di ostacolo alla conduzione agiscono indipendentemente l'uno dall'altro.

Tabella 6.1 Conducibilità elettrica a temperatura ambiente per nove metalli e leghe di uso comune

Metallo	Conducibilità elettrica	
	[($\Omega \cdot m$) $^{-1}$]	
Argento	6.8	$\times 10^7$
Rame	6.0	$\times 10^7$
Oro	4.3	$\times 10^7$
Alluminio	3.8	$\times 10^7$
Ottone (70Cu-30Zn)	1.6	$\times 10^7$
Ferro	1.0	$\times 10^7$
Platino	0.94	$\times 10^7$
Acciaio al carbonio	0.6	$\times 10^7$
Acciaio inossidabile	0.2	$\times 10^7$

Regola di Matthiessen – per un metallo, la resistività totale è pari alla somma dei contributi dovuti ai fattori termici, alle impurezze e alla deformazione

regola di Matthiessen

Dipendenza del contributo termico della resistività dalla temperatura

Influenza delle impurezze sulla resistività di una soluzione solida – dipendenza dalla concentrazione dell'impurezza

Influenza delle impurezze sulla resistività (lega bifasica) – dipendenza dalla frazione volumetrica e dalla resistività delle due fasi

Quanto detto può esimersi con la seguente espressione:

$$\rho_{\text{totale}} = \rho_t + \rho_i + \rho_d \quad (6.5)$$

nella quale ρ_t , ρ_i e ρ_d rappresentano, rispettivamente, i singoli contributi alla resistività dei fattori termici, delle impurezze e della deformazione plastica. L'Equazione 6.5 è anche conosciuta come la **regola di Matthiessen**. L'influenza di ciascuna ρ sulla resistività totale è mostrata in Figura 6.3 da un diagramma di resistività in funzione della temperatura, per il rame e alcune leghe rame-nichel negli stati ricotto e incrudito. La natura additiva dei singoli contributi alla resistività è evidenziata a -100°C.

Influenza della temperatura

Per il metallo puro e per le leghe rame-nichel mostrate in Figura 6.3, al di sopra di circa -200°C la resistività cresce linearmente con la temperatura nel modo seguente:

$$\rho_t = \rho_0 + aT \quad (6.6)$$

dove ρ_0 ed a sono costanti per ciascun metallo. La dipendenza della componente termica della resistività dalla temperatura è dovuta all'incremento delle vibrazioni termiche all'aumentare della temperatura e ad altre irregolarità del reticolo (es. vacanze), che si comportano come centri di scattering per gli elettroni.

Influenza delle impurezze

La resistività di un materiale ρ_i , formato da una soluzione solida con una determinata impurezza, è funzione della concentrazione c_i , del soluto, espressa come frazione atomica percentuale (at%/100), nel modo seguente:

$$\rho_i = A c_i (1 - c_i) \quad (6.7)$$

dove A è una costante indipendente dalla composizione, che è funzione sia del soluto che del metallo ospitante. L'influenza del nichel sulla resistività del rame a temperatura ambiente è mostrata in Figura 6.4, per valori sino al 50% in peso di nichel; entro questo intervallo di composizione il nichel è completamente solubile nel rame. Anche in questo caso gli atomi di nichel nel rame si comportano come centri di scattering, per cui aumentando il tenore di nichel, si incrementa la resistività.

Per una lega bifasica formata da una fase α e una β , si può utilizzare un'espressione tipo regola delle miscele che approssima la resistività nel modo seguente:

$$\rho_i = \rho_\alpha V_\alpha + \rho_\beta V_\beta \quad (6.8)$$

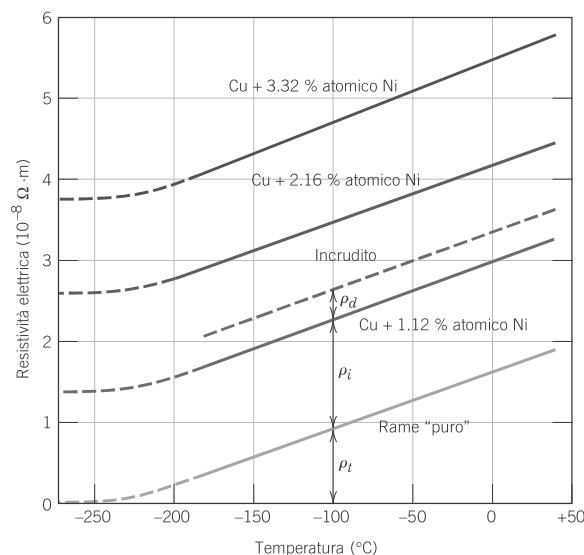


Figura 6.3 Resistività elettrica in funzione della temperatura per il rame e tre leghe rame-nichel, una delle quali è stata incrudita. Alla temperatura di -100°C sono segnati i contributi derivanti dalle vibrazioni termiche, dalle impurezze e dalle deformazioni. [Da J. O. Linde, *Ann. Physik*, 5, 219 (1932); e C. A. Wert e R.M. Thomson, *Physics of Solids*, 2nd edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1970].

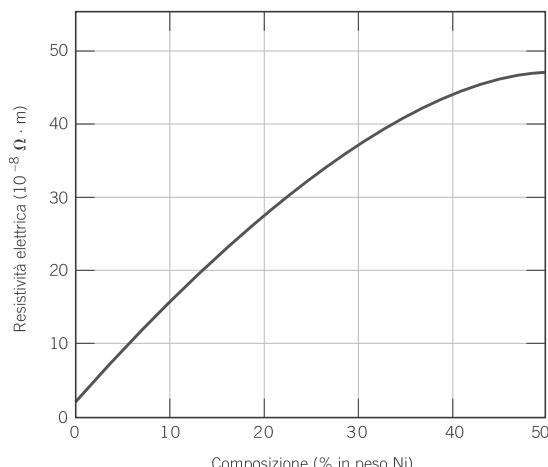


Figura 6.4 Resistività elettrica, a temperatura ambiente, delle leghe rame-nichel, al variare del tenore di nichel.

dove V e ρ rappresentano, rispettivamente, le frazioni volumetriche e le resistività delle due fasi.

Influenza della deformazione plastica

Anche la deformazione plastica incrementa la resistività elettrica, in seguito all'incremento del numero di dislocazioni che provocano scattering degli elettroni. L'effetto della deformazione sulla resistività è mostrato in Figura 6.3. La sua influenza, tuttavia, è molto più debole di quella dovuta all'aumento della temperatura o alla presenza di impurezze.



Verifica dei concetti 6.1

Le resistività elettriche a temperatura ambiente del piombo e dello stagno puri sono rispettivamente 2.06×10^{-7} e $1.11 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$.

- (a) Tracciare un diagramma che mostri la variazione della resistività elettrica, a temperatura ambiente, in funzione della composizione per tutte le composizioni comprese fra il piombo puro e lo stagno puro.
- (b) Sullo stesso diagramma riportare in modo schematico la resistività in funzione della composizione a 150°C .
- (c) Spiegare la forma delle due curve e la loro differenza.

Suggerimento: Si può consultare il diagramma di fase piombo-stagno di Figura 7.7

6.6 CARATTERISTICHE ELETTRICHE DELLE LEGHE COMMERCIALI

Grazie alle ottime proprietà elettriche il rame è il metallo conduttore più impiegato. In particolare il rame ad alta conducibilità esente da ossigeno (OFHC), che contiene bassissimi tenori di ossigeno e altre impurezze, è utilizzato in molte applicazioni elettriche. Anche l'alluminio è usato frequentemente come conduttore elettrico, pur avendo conducibilità pari a circa la metà di quella del rame. L'argento ha conducibilità superiore sia al rame che all'alluminio, ma il suo uso è limitato dal costo elevato.

In determinate applicazioni può essere necessario aumentare la resistenza meccanica di una lega metallica senza però diminuirne significativamente la conducibilità elettrica. Ma, come visto in precedenza, sia l'alligazione che la lavorazione a freddo aumentano la resistenza meccanica a spese della conducibilità elettrica, per cui in questi casi è necessario trovare un compromesso tra queste due proprietà. Si può anche aumentare la resistenza meccanica creando una seconda fase, che non presenti effetti troppo negativi sulla conducibilità. È il caso delle leghe rame-berillio per le quali l'incremento delle proprietà meccaniche si ottiene effettuando un

indurimento per precipitazione; anche così, tuttavia, la conducibilità si riduce, rispetto al rame ad alta purezza, di un fattore pari a circa 5.

Per alcune applicazioni, quali gli elementi riscaldanti di un forno, è richiesta invece un'elevata resistività elettrica. La perdita di energia da parte degli elettroni che sono deviati è infatti dissipata come energia termica, con tutti i vantaggi che ciò può comportare. Per questo genere di applicazione, i materiali devono presentare non soltanto alta resistività, ma anche ottima resistenza all'ossidazione a elevate temperature e, ovviamente, alta temperatura di fusione. Per gli elementi riscaldanti si usa comunemente il nichrome, una lega di nichel e cromo.

Semiconduzione

semiconduttore intrinseco

La conducibilità elettrica dei materiali semiconduttori non è così elevata come quella dei metalli; ciononostante essi hanno caratteristiche elettriche uniche che li rendono particolarmente utili. Le proprietà elettriche di questi materiali sono estremamente influenzate dalla presenza di impurezze, anche se in concentrazioni minime.

semiconduttore estrinseco

I **semiconduttori intrinseci** sono quelli che presentano un comportamento elettrico basato sulla struttura elettronica del materiale allo stato puro. Se le caratteristiche elettriche sono invece determinate da atomi di impurezza, il semiconduttore è chiamato **estrinseco**.

6.7 SEMICONDUZIONE INTRINSECA

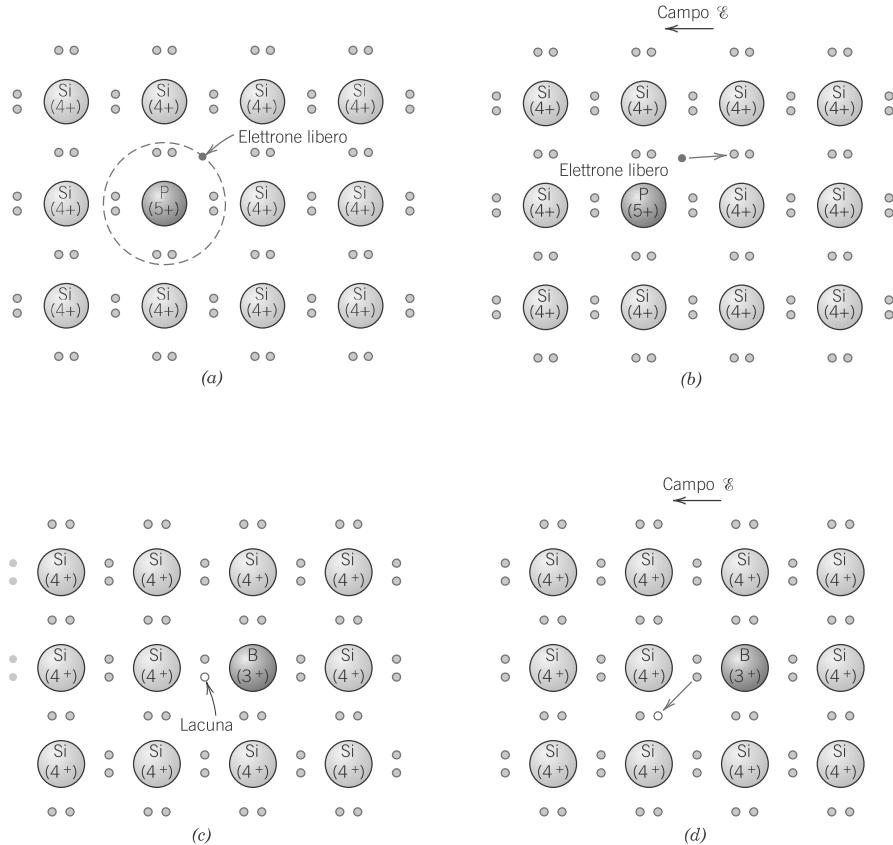
I semiconduttori intrinseci sono caratterizzati dalla struttura di banda elettronica mostrata in Figura 6.2d: a 0 K, presentano una banda di valenza completamente occupata, separata dalla banda di conduzione, vuota, da una banda energetica di separazione di energia relativamente bassa, generalmente inferiore a 2 eV. I due principali elementi semiconduttori sono il silicio (Si) e il germanio (Ge), che presentano energie di banda di separazione, rispettivamente, pari a 1.1 e 0.7 eV. Altri numerosi composti chimici semiconduttori presentano comportamento intrinseco. Un gruppo di questi è costituito da elementi dei Gruppi IIIA e VA, per esempio l'arsenico di gallio (GaAs) e l'antimonio di indio (InSb), spesso denominati composti III-V. Si comportano da semiconduttori anche i composti costituiti da elementi dei Gruppi IIB e VIA, quali il sulfuro di cadmio (CdS) e il telluro di zinco (ZnTe). Tanto maggiore è la distanza tra le rispettive posizioni nella tavola periodica dei due elementi che formano questi composti, tanto più il legame atomico acquisisce il carattere ionico e tanto più aumenta il valore dell'energia della banda di separazione. Il materiale tende quindi a diventare più isolante.

6.8 SEMICONDUZIONE ESTRINSECA

In pratica, tutti i semiconduttori commerciali sono estrinseci, vale a dire che il comportamento elettrico è determinato da impurezze che, se presenti anche in concentrazione minima, generano eccedenze di elettroni e di lacune. Per esempio, una concentrazione di impurezze di un atomo su 10^{12} è sufficiente a rendere il silicio estrinseco a temperatura ambiente.

I semiconduttori estrinseci possono essere di due tipologie: tipo *n* e tipo *p* (Figura 6.5). Per illustrare come queste si realizzano si consideri il silicio, tipico semiconduttore. Un atomo di Si ha quattro elettroni, ciascuno dei quali è legato con legame covalente a uno dei quattro atomi di Si adiacenti. Ora si supponga che sia aggiunto come impurezza sostituzionale un atomo di un altro elemento con valenza 5, come quelli del Gruppo VA della tavola periodica (per esempio P, As e Sb) o un atomo. Dei cinque elettroni di valenza di questi atomi di impurezza se ne possono utilizzare solo quattro per formare i legami poiché gli atomi adiacenti sono in grado di fornire solo quattro legami. L'elettrone in più senza legame è solo blandamente legato all'atomo introdotto, con una debole attrazione eletrostatica. L'energia di legame di questo elettrone è relativamente piccola e pertanto, essendo facilmente rimovibile dall'atomo, diviene un elettrone libero o di conduzione. In questo tipo di

Figura 6.5 Modelli di semiconduttore estrinseco di tipo *n* (*a* e *b*) e di tipo *p* (*c* e *d*). (*a*) Un atomo di impurezza quale il fosforo, con cinque elettroni di valenza, può sostituire un atomo di silicio. Si ottiene in tal modo un elettrone in più, rispetto a quelli di legame, che è legato all'atomo di impurezza e orbita intorno a esso. (*b*) Mediante eccitazione con un campo elettrico si forma un elettrone libero. (*c*) Un atomo di impurezza come il boro, che ha tre elettroni di valenza, è in grado di sostituire un atomo di silicio. Con l'introduzione di questo atomo si perde pertanto un elettrone di valenza e si crea quindi una lacuna. (*d*) Moto di questa lacuna da parte di un campo elettrico.



materiale, detto semiconduttore estrinseco di tipo *n*. Gli elettroni sono portatori di carica maggioritari grazie alla loro densità o concentrazione; le lacune, da parte loro, sono portatori di carica minoritari.

Aggiungendo invece atomi trivalenti – quali l'alluminio, il boro, il gallio – del Gruppo IIIA della tavola periodica, si ottiene un effetto opposto a quello appena descritto. Attorno a ogni atomo viene a mancare un legame covalente; questa mancanza può essere vista come una lacuna debolmente legata all'atomo di impurezza. Questa lacuna può essere liberata dall'atomo di impurezza, mediante trasferimento di un elettrone da un legame adiacente. In sostanza l'elettrone e la lacuna si scambiano di posizione. Per questo tipo di conduzione estrinseca, la concentrazione delle lacune è molto più elevata di quella degli elettroni (vale a dire che $p \gg n$), per cui il materiale è chiamato semiconduttore estrinseco di tipo *p*, perché responsabili della conduzione elettrica sono le particelle caricate positivamente.

Se un semiconduttore viene sottoposto a droggaggio di tipo differente alle due estremità, (di tipo *p* da un lato di tipo *n* dall'altro) si ottengono le cosiddette giunzioni *p-n* che sono ampiamente utilizzate nella realizzazione di diodi, o raddrizzatori, dispositivi elettronici che consentono alla corrente di fluire solo in una direzione.

Conduzione elettrica nei ceramici ionici e nei polimeri

6.9 CONCETTI DI BASE

Gran parte dei polimeri e dei ceramici ionici sono isolanti a temperatura ambiente e, perciò, hanno strutture a bande di energia simili a quelle rappresentate in Figura 6.2c; la banda di valenza piena è separata dalla banda di conduzione vuota da un dislivello energetico relativamente grande, in genere maggiore di 2 eV. Pertanto,

alle temperature normali, solo pochissimi elettroni possono venire eccitati, dall'energia termica disponibile, a un valore tale da poter superare il dislivello energetico; la conducibilità presenta quindi valori molto bassi. In Tabella 6.2 si riportano le conducibilità elettriche a temperatura ambiente di alcuni di questi materiali (le resistività elettriche di numerosi materiali ceramici e polimerici vengono date nella Tabella B.9, Appendice B). Molti materiali vengono impiegati per la loro capacità isolante, per cui si ricerca un'elevata resistività.

All'aumentare della temperatura i materiali isolanti migliorano la loro conducibilità elettrica, che alla fine può divenire maggiore di quella dei semiconduttori.

Comportamento dielettrico

dielettrico

Un materiale **dielettrico** è un isolante elettrico (non metallico) e presenta, o può essere realizzato per presentare, una struttura a dipolo elettrico; vale a dire che, a livello molecolare o atomico, vi è separazione fra entità con cariche positive e quelle con cariche negative. Il concetto di dipolo elettrico è già stato introdotto nel Capitolo 2. In virtù delle interazioni del dipolo con i campi elettrici, i materiali dielettrici sono utilizzati nei condensatori.

6.10 CAPACITÀ

capacità

Capacità espressa come carica immagazzinata per una determinata tensione applicata

Se a un condensatore si applica una differenza di potenziale, un'armatura si carica positivamente e l'altra negativamente, mentre il campo elettrico corrispondente è diretto dal positivo al negativo. La **capacità** C è funzione della quantità di carica Q immagazzinata in ciascuna armatura secondo la seguente relazione

$$C = \frac{Q}{V} \quad (6.9)$$

dove V è la tensione applicata al condensatore. Le unità della capacità sono Coulomb per Volt, o Farad (F).

Ora si consideri un condensatore con piastre parallele al cui interno sia stato realizzato il vuoto (Figura 6.6a). La capacità può essere calcolata dalla relazione

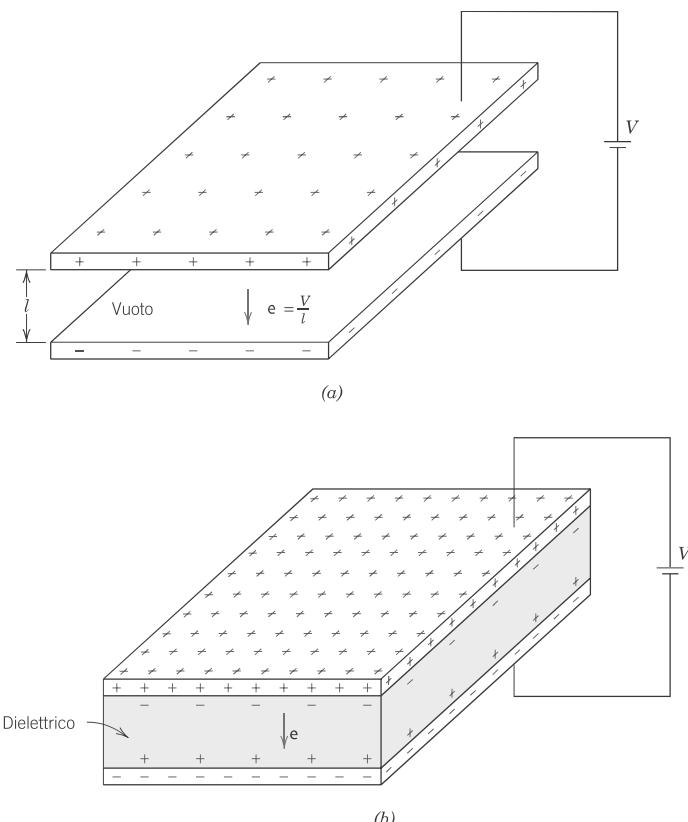
Tabella 6.2 Conducibilità elettriche tipiche a temperatura ambiente per 13 materiali non metallici

Materiale	Conducibilità elettrica [$(\Omega \cdot m)^{-1}$]
Grafite	$3 \times 10^4 - 2 \times 10^5$
<i>Ceramici</i>	
Calcestruzzo (secco)	10^{-9}
Vetro sodico-calcico	$10^{-10} - 10^{-11}$
Porcellana	$10^{-10} - 10^{-12}$
Vetro borosilicato	$\sim 10^{-13}$
Ossido di alluminio	$< 10^{-13}$
Silice fusa	$< 10^{-18}$
<i>Polimeri</i>	
Fenolo-formaldeide	$10^{-9} - 10^{-10}$
Poli(metilmacrilato)	$< 10^{-12}$
Nylon 6,6	$10^{-12} - 10^{-13}$
Polistirene	$< 10^{-14}$
Polietilene	$10^{-15} - 10^{-17}$
Politetrafluoroetilene	$< 10^{-17}$

Figura 6.6

Condensatore a piastre parallele (a) nel vuoto e (b) con un materiale dielettrico interposto.

(Da K. M. Ralls, T. H. Courtney e J. Wulff, *Introduction to Materials Science and Engineering*. Copyright © 1976 by John Wiley & Sons, Inc. Riprodotto per concessione di John Wiley & Sons, Inc.).



Capacità di un condensatore con piastre parallele, nel vuoto

permittività

Capacità di un condensatore con piastre parallele, con materiale dielettrico

costante dielettrica

Definizione di costante dielettrica

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{l} \quad (6.10)$$

dove A rappresenta l'area delle piastre e l è la distanza tra di esse. Il parametro ϵ_0 , chiamato **permittività** del vuoto, è una costante universale che ha il valore di 8.85×10^{-12} F/m.

Se tra le piastre si inserisce un materiale dielettrico (Figura 6.6b), allora

$$C = \epsilon \frac{A}{l} \quad (6.11)$$

dove ϵ è la costante dielettrica assoluta di questo dielettrico, che è maggiore di ϵ_0 . La permittività relativa, ϵ_r , spesso chiamata **costante dielettrica**, è data dal rapporto

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (6.12)$$

che è maggiore dell'unità e rappresenta l'incremento della capacità di immagazzinare carica a seguito dell'inserzione del dielettrico tra le piastre. La costante dielettrica è una caratteristica del materiale ed è la prima a essere presa in considerazione per il progetto di un condensatore. I valori di ϵ_r per alcuni materiali dielettrici sono riportati in Tabella 6.3.

6.11 RIGIDITÀ DIELETTRICA

Quando ai materiali dielettrici vengono applicati campi elettrici molto elevati, un gran numero di elettroni può essere improvvisamente eccitato a energie tali da riuscire a spostarsi all'interno della banda di conduzione. Ne consegue che, in seguito al moto di questi elettroni, aumenta enormemente la corrente che attraversa il die-

Tabella 6.3 Costante dielettrica e rigidità dielettrica di alcuni materiali dielettrici

Materiale	Costante dielettrica	Rigidità dielettrica (V/mil) ^a
Ceramici		
Titanati ceramici	15 – 10 ⁴	50 – 300
Mica	5.4 – 8.7	1000 – 2000
Steatite (MgO–SiO ₂)	5.5 – 7.5	200 – 350
Vetro sodico-calcico	6.9	250
Porcellana	6.0	40 – 400
Silice fusa	3.8	250
Polimeri		
Fenolo-formaldeide	4.8	300 – 400
Nylon 6,6	3.6	400
Polistirene	2.6	500 – 700
Polietilene	2.3	450 – 500
Politetrafluoroetilene	2.1	400 – 500

^a 1 mil = 0.0025 cm. Le rigidità dielettriche riportate sono valori medi, dal momento che dipendono sia dallo spessore e geometria del campione che dalla velocità di applicazione e dalla durata del campo elettrico applicato.

rigidità dielettrica

lettrico, per cui a volte si producono fusioni localizzate, bruciature o vaporizzazioni che portano a un degrado irreversibile del materiale che può arrivare al cedimento. Questo fenomeno è noto come *scarica disruptiva del dielettrico* (dielectric breakdown). La **rigidità dielettrica**, a volte chiamata resistenza alla scarica, rappresenta il valore di campo elettrico necessario a produrre la scarica. In Tabella 6.3 sono state riportate le rigidità dielettriche di alcuni materiali.

6.12 MATERIALI DIELETTRICI

Numerosi ceramici e polimeri sono utilizzati come isolanti e/o nei condensatori. Diversi ceramici, come il vetro, la porcellana, la stearite e la mica, hanno costanti dielettriche comprese tra 6 e 10 (Tabella 6.3). Questi materiali presentano anche un elevato grado di stabilità dimensionale e di resistenza meccanica. Trovano tipiche applicazioni nelle linee elettriche e come isolanti elettrici, nei supporti degli interruttori e nelle prese elettriche. Il biossido di titanio (TiO_2) e i ceramici titanati, come il titanato di bario ($BaTiO_3$), possono essere prodotti con costanti dielettriche estremamente elevate, che li rendono particolarmente adatti per applicazioni nei condensatori.

Il valore della costante dielettrica per la maggior parte dei polimeri è minore di quello dei ceramici ed è compreso generalmente tra 2 e 5. Questi materiali sono comunemente utilizzati per l'isolamento dei fili elettrici, dei cavi, dei motori, dei generatori, ecc., e anche per alcuni condensatori.

Altre caratteristiche elettriche dei materiali

Meritano un breve cenno altre due importanti e relativamente nuove caratteristiche elettriche che sono proprie di alcuni materiali, quali la ferrolettricità e la piezoelettricità.

6.13 FERROELETTRICITÀ

ferrolettrico

Nei materiali dielettrici detti **ferrolettrici** sono presenti dipoli elettrici permanenti la cui interazione li porta ad allinearsi mutuamente nella stessa direzione. Altri materiali presentano la ferrolettricità; tra questi si possono citare il sale di Rochelle

(tartrato sodico potassico) ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), il fosfato basico di potassio (KH_2PO_4), il niobato di potassio (KNbO_3) e il titanato-zirconato di piombo ($\text{Pb}[\text{ZrO}_3, \text{TiO}_3]$). I materiali ferrooelettrici hanno costanti dielettriche estremamente elevate; per esempio, a temperatura ambiente, ϵ_r del titanato di bario può raggiungere il valore di 5000. Di conseguenza i condensatori realizzati con questi materiali possono essere molto più piccoli dei condensatori realizzati con altri dielettrici.

6.14 PIEZOELETTRICITÀ

Una proprietà singolare di un gruppo non numeroso di materiali ceramici è rappresentata dalla piezoelettricità o, letteralmente, elettricità per pressione: sottoponendo il materiale a una forza esterna si genera un campo elettrico. Invertendo il segno della forza esterna (da trazione a compressione) si inverte la direzione del campo elettrico.

piezoelettrico

I materiali piezoelettrici sono utilizzati nei trasduttori, vale a dire in quei dispositivi che convertono energia elettrica in deformazione meccanica e viceversa. Tra le applicazioni più note dei piezoelettrici si possono citare i fonorivelatori, i microfoni, gli altoparlanti, gli allarmi e i visualizzatori di ultrasuoni. Nel caso del fonorivelatore, la puntina, quando scorre sui solchi di un disco, trasmette delle variazioni di pressione a un materiale **piezoelettrico**, situato nella testina stessa, che le trasforma in segnali elettrici, che sono poi amplificati e inviati agli altoparlanti.

I materiali piezoelettrici più comuni sono il titanato di bario e piombo, lo zirconato di piombo (PbZrO_3), il fosfato acido di ammonio ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) e il quarzo.

Proprietà termiche

Le *proprietà termiche* si riferiscono alla reazione che oppone un materiale alla somministrazione di calore. Man mano che assorbe energia sotto forma di calore, il solido aumenta di temperatura e di dimensione. Se si viene a determinare un gradiente di temperatura, l'energia può essere trasportata alle regioni più fredde del solido. Continuando a somministrare calore, si può infine arrivare alla fusione. Nell'utilizzo pratico dei solidi, la capacità termica, l'espansione termica e la conducibilità termica sono spesso proprietà critiche.

6.15 CAPACITÀ TERMICA

capacità termica

Quando si scalda un solido, la sua temperatura aumenta, il che sta a significare che ha assorbito dell'energia termica. La **capacità termica** indica la capacità di un materiale di assorbire calore dall'ambiente esterno e rappresenta la quantità di energia richiesta per produrre l'aumento di una unità di temperatura. In termini analitici, la capacità termica C è espressa dalla relazione:

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad (6.13)$$

Definizione di capacità termica – rapporto tra la variazione di energia (guadagnata o persa) e la conseguente variazione di temperatura

calore specifico

dove dQ è l'energia richiesta per produrre una variazione di temperatura dT . In genere, la capacità termica viene espressa per mole di materiale (es. J/mole · K o cal/mole · K). Talvolta si parla il **calore specifico** (indicato in genere con una c minuscola), che rappresenta la capacità termica per unità di massa, e ha varie unità di misura (J/kg · K, cal/g · K). C_v e C_p indicano la capacità termica di un solido, misurata mantenendo costante rispettivamente il suo volume e la pressione esterna.

Capacità termica vibazionale

Per la maggior parte dei solidi, il modo principale di assorbire energia termica è quello di aumentare l'energia di vibrazione degli atomi. Nei solidi gli atomi sono costantemente in vibrazione a frequenza molto elevata e con ampiezza relativamente piccola. Gli atomi non vibrano in modo indipendente l'uno dall'altro, ma vibrano insieme a quelli adiacenti, in virtù del legame atomico. Queste vibrazioni sono coor-

fonone

dinate in modo tale da dare origine a onde che attraversano il reticolo. Queste possono essere immaginate come onde elastiche o semplicemente onde sonore, di bassa lunghezza d'onda e di frequenza molto elevata, che si propagano attraverso il cristallo alla velocità del suono. L'energia termica vibrazionale di un materiale è formata da una serie di queste onde elastiche, distribuite su un certo intervallo di frequenza. Sono consentiti solo certi valori di energia (si dice che l'energia è *quantizzata*) e un singolo quanto di energia vibrazionale è definito **fonone** (un fonone è analogo al quanto della radiazione elettromagnetica, il *fotone*). Di conseguenza le onde vibrazionali sono denominate fononi.

Esistono anche altri meccanismi di assorbimento di energia che contribuiscono alla formazione della capacità termica totale di un solido, sebbene nella maggior parte dei casi il contributo vibrazionale sia maggioritario. Gli elettroni, infatti, possono assorbire energia termica trasformandola in cinetica e fornendo quindi un "contributo elettronico" all'assorbimento di calore. Questo è naturalmente possibile nei metalli, che possiedono elettroni liberi, anche se questi rappresentano una frazione minoritaria rispetto al numero totale. Nei materiali isolanti e semiconduttori la frazione di elettroni che può venire eccitata è ancora più piccola. Quindi, questo contributo elettronico è in genere insignificante, a meno che non ci si trovi a temperature prossime a 0 K.

6.16 ESPANSIONE TERMICA

Variazione relativa di lunghezza, dovuta all'espansione termica, in funzione del coefficiente di espansione termica lineare e della variazione di temperatura

coefficiente di espansione termica lineare

La maggior parte dei solidi si dilata per riscaldamento e si contrae per raffreddamento. La variazione di lunghezza con la temperatura può essere espressa, per un materiale solido, come:

$$\frac{l_f - l_0}{l_0} = \alpha_l (T_f - T_0) \quad (6.14a)$$

o

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha_l \Delta T \quad (6.14b)$$

dove l_0 e l_f rappresentano, rispettivamente, le lunghezze iniziale e finale quando la temperatura varia da T_0 a T_f . Il parametro α_l è chiamato **coefficiente di espansione termica lineare** e indica quanto un materiale si dilata per riscaldamento; l'unità di misura è il reciproco della temperatura [$^{\circ}\text{C}$ $^{-1}$ o K^{-1}]. Naturalmente, il riscaldamento, o il raffreddamento, ha influenza su tutte le dimensioni di un corpo e porta, quindi, a una variazione di volume. Le variazioni di volume con la temperatura possono essere calcolate da:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \alpha_v \Delta T \quad (6.15)$$

dove ΔV e V_0 sono, rispettivamente, la variazione del volume e il volume originario e α_v è il coefficiente di espansione termica volumetrica. In alcuni materiali, il valore di α_v è anisotropo, dipende, cioè, dalla direzione cristallografica lungo la quale viene misurato. Per i materiali in cui l'espansione termica è isotropa, α_v è approssimativamente $3\alpha_l$.

Nella Tabella 6.4 sono elencati i coefficienti di espansione termica lineare per vari materiali. Si può osservare che i valori crescono con l'aumentare della temperatura. I valori riportati si riferiscono alla temperatura ambiente, salvo indicato diversamente. Un elenco più completo dei coefficienti di espansione termica viene fornito nella Tabella B.6 dell'Appendice B.

Metalli

In Tabella 6.4 si osserva che il coefficiente di espansione termica lineare per i metalli più comuni va da circa 5×10^{-6} a 25×10^{-6} ($^{\circ}\text{C}$) $^{-1}$; questi valori sono intermedi tra



William D. Callister • David G. Rethwisch

Materiali per l'Ingegneria Civile ed Industriale

Accedi ai contenuti digitali ➤ Espandi le tue risorse ➤ con un libro che **non pesa** e si **adatta** alle dimensioni del tuo **lettore**



All'interno del volume il **codice personale** e le istruzioni per accedere ai contenuti digitali.
L'accesso alle risorse digitali è **gratuito** ma limitato a **18 mesi dalla attivazione del servizio**.

