

Sergeij I. Molokovski
Anatoli D. Suschkov

**Intensive
Elektronen- und Ionenstrahlen**

Aus dem Programm
Physik

Materie – Feld – Struktur

von R. Starkl

Plasmaphysik

von R. Goldston und P. H. Rutherford

Physik und Umwelt

von E. Boeker und R. van Grondelle

vieweg

Sergeij I. Molokovski
Anatoli D. Suschkov

Intensive Elektronen- und Ionenstrahlen

Quellen – Strahlenphysik – Anwendungen

Aus dem Russischen
übersetzt von Günter Zschornack



Der deutschen Übersetzung liegt die 2. russische Auflage mit dem Titel „Intensive Elektronen- und Ionenstrahlen“, erschienen im Verlag Energoatomizdat, zugrunde.
© S. I. Molokovski

1. Auflage 1999

Alle Rechte vorbehalten

© Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden, 1999

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1999

Der Verlag Vieweg ist ein Unternehmen der Bertelsmann Fachinformation GmbH.



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

<http://www.vieweg.de>

Umschlaggestaltung: Ulrike Weigel, Niedernhausen

Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN-13: 978-3-322-83137-8 e-ISBN-13: 978-3-322-83136-1

DOI: 10.1007/978-3-322-83136-1

Aus dem Vorwort zur ersten russischen Auflage¹

Intensive Elektronen- und Ionenstrahlen, die bis vor kurzem nur in speziellen UHF-Anlagen und in Beschleunigern geladener Teilchen genutzt wurden, sind inzwischen leistungsstarke Instrumente für die thermische Bearbeitung und die Verbindung schwer-schmelzender Metalle, für die Auftragung von Beschichtungen, für den Erhalt neuer Strukturen und Materialien und sogar Treibstoff in elektrostatischen Raketentriebwerken geworden.

Die Optik intensiver Strahlen geladener Teilchen entwickelt sich sehr schnell. Viele Probleme sind bereits gut ausgearbeitet und in einer Reihe von Monographien systematisiert, jedoch hält der Entwicklungsprozeß mit hohem Tempo an. Es werden immer neue, vervollkommnete elektronen- und ionenoptische Systeme bekannt, es erweitern sich der Anwendungsbereich und die Spezifik der Anwendung entsprechender Systeme und es werden neue Berechnungsmethoden für diese Systeme ausgearbeitet bzw. erfolgt eine Vervollkommnung bekannter Methoden. Dies alles erfordert eine fortlaufende Verarbeitung der bekanntwerdenden Informationen sowie ihre Systematisierung und Verallgemeinerung.

Mit Ausnahme einiger Berechnungsformeln wird im vorliegenden Buch durchgängig das SI-System verwendet. Das beschränkte Volumen des Buches erlaubte es nicht, mit gleicher Vollständigkeit alle Besonderheiten intensiver Strahlen und der damit verbundenen Fragen darzustellen. Aus diesem Grund fanden Methoden der analogen Strahlmodellierung keine Berücksichtigung.

Die Autoren

¹Anmerkung des Übersetzers: Die erste russische Auflage erschien 1972 in Moskau im Verlag Energoatomizdat.

Vorwort zur zweiten russischen Auflage

In der seit der ersten Ausgabe des Buches (1972) vergangenen Zeit wurde die Entwicklung der Optik intensiver Strahlen geladener Teilchen durch eine bedeutende Erweiterung der Anwendungsbereiche dieser Strahlen charakterisiert, ebenso durch die Entwicklung neuer Klassen von Elektronen- und Ionenstrahlanlagen, von technologischen Prozessen und von Beschleunigern geladener Teilchen. Davon zeugen insbesondere auch das Erscheinen einiger Monographien der letzten Jahre, die intensiven Elektronen- und Ionenstrahlen gewidmet sind [8, 15, 12, 18].

In diesen Monographien wird ein großer Kreis von Fragen betrachtet, die mit physikalischen Prozessen des Erhalts, der Modellierung und der verschiedenartigsten Anwendungen von Strahlen geladener Teilchen verbunden sind. Jedoch werden dabei Fragen der Projektierung von elektronen- und ionenoptischen Systemen und der Formierung, des Transports und der Fokussierung intensiver Strahlen praktisch nicht behandelt. Daher werden in der zweiten Auflage des vorliegenden Buches neben der Darlegung der theoretischen Grundlagen der Optik intensiver Strahlen geladener Teilchen, darunter auch relativistischer Strahlen, eine große Vielfalt von elektronen- und ionenoptischen Geräten und Systemen sowie Methoden ihrer Berechnung und Projektierung betrachtet.

Besondere Aufmerksamkeit gilt hier Methoden der automatischen Projektierung mit Computerprogrammen für die Synthese, Analyse und Optimierung von elektronen- und ionenoptischen Systemen. Darüber hinaus enthält die vorliegende Ausgabe Material über experimentelle Methoden der Untersuchung von Elektronenstrahlen.

Die Kapitel 2 bis 5, 7 bis 10 und der Anhang wurden von S.I.Molokovski und die Kapitel 1, 6 und 12 von A.D.Suschkov geschrieben².

Die Autoren

²Anmerkung des Übersetzers: Als Kapitel 11 wurde ein zusätzliches Kapitel in die deutsche Übersetzung eingefügt, welches von S.I.Molokovski geschrieben wurde. Damit ändert sich die Numerierung von Kapitel 11 im Originaltext in Kapitel 12 in der vorliegenden Übersetzung. Die zweite (hier übersetzte und ergänzte) Auflage erschien 1991 in Moskau im Verlag Energoatomizdat.

Inhaltsverzeichnis

1	Formierung intensiver Elektronen- und Ionenstrahlen	1
1.1	Strahlparameter und Klassifikation von teilchenoptischen Systemen	1
1.2	Formierung von Elektronenstrahlen in elektronischen Geräten	6
1.3	Fokussierende (transportierende) Systeme	16
1.4	Elektronenoptische Systeme in technologischen Elektronenstrahlanalgen .	24
1.5	Ionenoptische Systeme	30
2	Methoden der Feldberechnung elektronenoptischer Systeme	34
2.1	Grundlegende Gleichungen für das elektrostatische Feld	34
2.2	Berechnung elektrostatischer Felder. Das Dirichlet-Problem	35
2.3	Berechnung elektrostatischer Felder. Das Cauchy-Problem	42
2.4	Computergestützte Berechnung elektrostatischer Felder	47
2.5	Grundlegende Gleichungen des magnetischen Feldes	54
3	Bewegung einfach geladener Teilchen	66
3.1	Allgemeine Bewegungsgleichungen	66
3.2	Bewegung von Teilchen in axialsymmetrischen Feldern	69
3.3	Bewegung von Teilchen in planparallelen Feldern	73
3.4	Numerische Berechnungsmethoden für Trajektorien geladener Teilchen . .	74
3.5	Elektrostatische Linsen	77
3.6	Magnetische Solenoidlinsen	86
3.7	Magnetische Linsen aus Permanentmagneten	93
4	Transport von Strömen geladener Teilchen	97
4.1	Besonderheiten des Transportes geladener Teilchen	97
4.2	Vereinfachte physikalische Modelle von Strömen geladener Teilchen	101
4.3	Gleichungssysteme in der hydrodynamischen Näherung	104
4.4	Genäherte Berechnung des Coulombfeldes	107
4.5	Strahltransportberechnung in feldfreien Kanälen	110
4.6	Der Einfluß positiver Ionen auf die Ausbreitung von Elektronenstrahlen .	112
4.7	Streung von Elektronenstrahlen an Restgasmolekülen	116
4.8	Einfluß der Anfangsgeschwindigkeiten auf die Strahlkonfiguration	120
4.9	Lösungsmethodik selbstkonsistenter elektronenoptischer Aufgaben	124

5	Elektronenkanonen	127
5.1	Die Formierung von Elektronenstrahlen	127
5.2	Kanonen zur Formierung von bandförmigen Strahlen	128
5.3	Kanonen zur Formierung dichter axialsymmetrischer Strahlen	135
5.4	Kanonen zur Formierung hohler axialsymmetrischer Strahlen	144
5.5	Elektronenkanonen mit Steuerelektroden	148
5.6	Rechnergestützte Projektierung von Elektronenkanonen	154
6	Kanonen mit Autoemissions- und Plasmaemittern	158
6.1	Grundlegende Eigenschaften und Kanonenparameter	158
6.2	Schwachstromelektronen- und Ionenkanonen mit Autoemissionskathoden	159
6.3	Starkstromelektronenkanonen mit Explosionsemmissionskathoden	163
6.4	Elektronen- und Ionenplasmaquellen	165
6.5	Extraktion geladener Teilchen und Formierung von Teilchenstrahlen	171
7	Magnetisch fokussierende Systeme	177
7.1	Fokussierung voller axialsymmetrischer Strahlen im Magnetfeld	177
7.2	Systeme zur reversiven und periodischen Fokussierung	191
7.3	Fokussierung hohler axialsymmetrischer Strahlen	198
7.4	Systeme zur Fokussierung bandförmiger Elektronenstrahlen	204
7.5	Projektierung magnetisch fokussierender Systeme	206
8	Elektrostatisch fokussierende Systeme	209
8.1	Fokussierungssysteme für volle axialsymmetrische Strahlen	209
8.2	Fokussierungssysteme für bandförmige Strahlen	221
8.3	Fokussierung hohler axialsymmetrischer Strahlen	222
9	Elektronenoptische Sondensysteme	225
9.1	Elektronenoptische Systeme in Elektronenstrahl- schweißanlagen	225
9.2	Elektronenoptische Systeme der Elektronenstrahlolithographie	229
9.3	Elektronenoptische Systeme von Anlagen zur Ionenimplantation	232
10	Transport intensiver relativistischer Strahlen geladener Teilchen	234
10.1	Relativistische Bewegungsgleichungen	234
10.2	Intensive relativistische Strahlen in Vakuumkanälen	236
10.3	Intensive neutralisierte Strahlen	243
10.4	Trajektorienanalyse relativistischer Elektronenstrahlen auf dem Computer	244
11	Elektronenoptische Vielstrahlensysteme	249
11.1	Besonderheiten und Anwendungsbereiche	249
11.2	Vielstrahlelektronenkanonen und magnetisch fokussierende Systeme	252
11.3	Besonderheiten der Formierung von Vielstrahlenelektronenflüssen	256
11.4	Wechselwirkung von Elektronenstrahlen	264

12 Elektronen- und Ionenstrahldiagnostik	269
12.1 Die Messung von Strahlparametern	269
12.2 Klassifikation und Charakteristik experimenteller Methoden	270
12.3 Beweglicher Kollektor mit geringer Appertur	274
12.4 Koaxiale Sonden mit Halbleitertarget	277
A Emittanz und Brighness	283
A.1 Emittanz	283
A.2 Brightness	285
A.3 Mittlere quadratische Emittanz	286
B Kommentierte FORTRAN-Programmtexte	288
B.1 Berechnung der Induktivität eines Solenoiden	288
B.2 Feldberechnung einer ringförmigen Magnetlinse	291
B.3 Feldberechnung einer elektrostatischen Linse	293
B.4 Graphische Darstellung der Resultate	297
Literaturverzeichnis	299
Index	308