



В. Л. Гинзбург

Выдающийся физик-теоретик

Нобелевский лауреат

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН
В ПЛАЗМЕ**



URSS

В. Л. Гинзбург

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ПЛАЗМЕ

Издание третье



URSS

МОСКВА

Гинзбург Виталий Лазаревич

Распространение электромагнитных волн в плазме. Изд. 3-е.

М.: ЛЕНАНД, 2015. — 688 с.

Одной из важнейших проблем физики плазмы (ионизированного газа) является изучение распространения в ней электромагнитных волн различных типов: радиоволн, плазменных волн, магнитогидродинамических волн и т. д. Сюда же как частный случай относится поведение плазмы в однородном в пространстве, но переменном во времени электрическом поле. Этот круг вопросов, который освещается в книге, представляет интерес при исследовании распространения радиоволн в ионосфере и межпланетной среде, для радиоастрономии и астрофизики, а также при изучении плазмы в лабораторных условиях.

В книге рассматривается распространение электромагнитных волн разной частоты как в изотропной, так и в магнитоактивной плазме. Обсуждается как случай однородной, так и случай неоднородной среды. Особое внимание уделено распространению радиоволн в ионосфере и космических условиях. Отдельная глава посвящена нелинейным явлениям в плазме, находящейся в переменном электромагнитном поле. Значительное место уделено учету пространственной дисперсии при распространении волн в плазме. В результате оказывается возможным исследовать все важнейшие случаи, представляющие интерес при изучении ионосферы, магнитосферы и космического пространства.

Для удобства читателей в двух параграфах дается сводка формул и, кроме того, книга снабжена большим списком дополнительной литературы.

Книга рекомендуется широкому кругу физиков — научным работникам, проводящим исследования в области физики плазмы, радиофизики, астрофизики, а также студентам и преподавателям.

ООО «ЛЕНАНД». 117312, г. Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, д. 11А, стр. 11.
Формат 60×90/16. Печ. л. 43. Зак. № 5592.

Отпечатано в ОАО «Первая Образцовая типография». Филиал «Чеховский печатный двор».
142300, Чехов, ул. Полиграфистов, д. 1.

ISBN 978-5-9710-1521-5

© ЛЕНАНД, 2014

16466 ID 188722



9 785971 015215



Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в Интернете, если на то нет письменного разрешения владельца.

Оглавление

Предисловие ко второму изданию	9
Предисловие к первому изданию	11
Принятые обозначения	13

Глава I

Основы теории распространения электромагнитных волн в плазме

§ 1. Общее введение. Параметры плазмы в различных случаях	17
Различные случаи распространения волн в плазме (17). Параметры плазмы (18). Особенности плазмы (20).	
§ 2. Основные уравнения. Характер используемых приближений	21
Уравнение поля. Материальное уравнение в линейной электродинамике (21). Частотная и пространственная дисперсии. Их роль в случае плазмы (24). Уравнения поля при неучете пространственной дисперсии («холодная» плазма) (28). Одномерные задачи. Плоские волны (31). Плазменные колебания (33). О распространении волн разных типов (34).	

Глава II

Распространение волн в однородной и изотропной плазме

§ 3. Комплексная диэлектрическая проницаемость «холодной» плазмы (элементарная теория)	37
Элементарный вывод выражений для ϵ и σ (37). Вопрос о действующем поле (40). Область применимости полученных формул (44). Магнитная проницаемость плазмы. Об учете пространственной дисперсии (47).	
§ 4. Метод кинетического уравнения	48
Функция распределения и кинетическое уравнение (48). Плазма в сильном электрическом поле (49). Вид функции распределения и уравнение для нее в слабом поле (52). Транспортные сечения. Дебаевское экранирование (56). О пределах применимости формул кинетической теории (61).	
§ 5. Несколько замечаний о микропроцессах в плазме	63
Микропроцессы в плазме и уравнения сохранения числа частиц разного сорта (63). Время замедления неравновесных электронов в плазме (68). Отклонение функции распределения от равновесной. Оценки для ионосферы (73).	
§ 6. Диэлектрическая проницаемость и проводимость плазмы (кинетическая теория)	75
Общие соотношения (75). Соударения с молекулами (77). Соударения с ионами (78). Роль междуэлектронных соударений (80). Число со-	

	ударений в ионосфере (81). Низкочастотный случай (84). Общий случай (любые частоты) (86). Соударения ионов с ионами и молекулами (89). Дисперсионные соотношения (92).	
§ 7.	Распространение электромагнитных (поперечных) волн в однородной плазме	92
	Показатели преломления и поглощения (92). О затухании волн при отсутствии поглощения (95). Выражения для n и k в предельных случаях (96). О вещественных и комплексных значениях частоты (97).	
§ 8.	Учет пространственной дисперсии. Плазменные и акустические волны	98
	Плазменные (продольные) волны. Феноменологический учет пространственной дисперсии (98). Кинетическая теория (104). Черенковское излучение в плазме. Поглощение плазменных волн (109). О поглощении и квазилинейной теории плазменных волн (116). Учет влияния ионов. Акустические волны (125). Квазигидродинамический метод (127). Продольные волны в двухтемпературной плазме (128).	
§ 9.	Сводка основных формул	131
	Поперечные волны (133). Продольные волны в плазме (136).	
 <i>Глава III</i>		
Распространение волн в однородной магнитоактивной плазме		
§ 10.	Тензор комплексной диэлектрической проницаемости	139
	О влиянии постоянного магнитного поля на свойства плазмы (139). Тензор комплексной диэлектрической проницаемости (элементарная теория) (141). Свойства тензора ϵ_{ij} (143). Тензор ϵ'_{ij} в других системах координат (145). Кинетическая теория (147). Влияние движения ионов (150).	
§ 11.	Распространение в магнитоактивной плазме высокочастотных волн	154
	Выражения для показателей преломления и поглощения $n_{1,2}$ и $k_{1,2}$ (154). Некоторые частные случаи (157). Распространение волн под произвольным углом α к магнитному полю (162). Распространение «светящихся атмосфериков» и «спиральных волн» в металлах (165). Поляризация волн (167). О нормальных волнах. Случай малых углов α (169). Учет поглощения (172). Квазипродольное и квазипоперечное распространение (175). Распространение двух когерентных нормальных волн. Вращение плоскости поляризации (эффект Фарадея) (176). Критическое число соударений и существенный кратный корень дисперсионного уравнения (179). Графики функций $n_{1,2}(\nu)$ и $k_{1,2}(\nu)$ (181). Влияние ионов на распространение высокочастотных волн (183). О поглощении и излучении электромагнитных волн магнитоактивной плазмой (186).	
§ 12.	Пространственная дисперсия и плазменные волны при наличии магнитного поля (учет теплового движения)	189
	Предельный переход к изотропной плазме (189). Об учете пространственной дисперсии в анизотропной среде (191). Квазигидродинамическое приближение (192). О плазменных волнах в магнитоактивной плазме (194). Кинетическая теория (196). Природа поглощения, не связанного с соударениями (197). О вычислении коэффициента поглощения с помощью закона Кирхгофа и методом коэффициентов Эйнштейна (203). Результаты кинетической теории для продольного распространения (угол $\alpha = 0$) (207). Резонансное поглощение при произвольном угле α (214). Область черенковского поглощения (район резонансной частоты ω_∞) (222). Случай обыкновенной волны при невысоких частотах (232). Резюме (233).	
§ 13.	Некоторые замечания о динамике плазмы	234
	Магнитогидродинамическое приближение (234). Квазигидродинамическое приближение (237). О движении чисто электронно-ионной плазмы	

и слабо ионизированного газа (241). Стационарное движение слабо ионизированного газа в магнитном поле. Случай земной ионосферы (244).

- § 14. Распространение низкочастотных и магнитогидродинамических волн 247
- Введение (247). Магнитогидродинамические волны (248). Низкочастотные волны (квазигидродинамическое рассмотрение). Продольное распространение (256). Об области применимости магнитогидродинамических формул (259). Углы α , близкие к $\pi/2$. «Гибридные» резонансы (260). Об области ионного гирорезонанса (262). Учет влияния молекул (264). Учет теплового движения. Некоторые результаты кинетической теории (изменение скорости, затухание при отсутствии соударений) (266).
- § 15. Сводка основных формул 272

Глава IV

Распространение волн в неоднородной изотропной среде (плазме)

- § 16. Введение. Приближение геометрической оптики 278
- Волновые уравнения. Плоскостная среда (278). Строгие решения для плоскостной среды (279). О приближенных решениях (280). Приближение геометрической оптики (280). Более строгое рассмотрение того же вопроса (284). Случай, когда приближение геометрической оптики неприменимо. Полное внутреннее отражение (287). Об отражении радиоволн от ионосферы (290). Совершенно неотражающий слой (291). Слабое отражение от слоя. Интерполяционная формула для $|R|$ в случае произвольного слоя (292). Отражение от скачка производной $\frac{dn}{dz}$ (295).
- § 17. Строгие решения волнового уравнения (линейный и параболический слой; слой $\epsilon' = \frac{a}{(b+z)^2}$) 297
- Введение (297). Линейный слой без поглощения (298). Поглощающий линейный слой (300). Параболический слой без поглощения (304). Слой $\epsilon' = \frac{a}{(b+z)^2}$ (306).
- § 18. Отражение и прохождение волн в случае «симметричного» и «переходного» слоев произвольной толщины 308
- Плывный слой с четырьмя параметрами (308). «Симметричный» слой (309). «Переходный» слой. Предельный переход к резкой границе раздела (311).
- § 19. Наклонное падение волн на слой 312
- Общие соотношения. Волна с электрическим вектором, перпендикулярным к плоскости падения (312). Приближение геометрической оптики (315). Лучевая трактовка (316). О волнах с электрическим вектором, лежащим в плоскости падения (317). Уравнение для магнитного поля волны (320).
- § 20. Об одной особенности поля электромагнитной волны, распространяющейся в неоднородной изотропной плазме. Взаимодействие электромагнитных и плазменных волн 321
- Физическая картина явления (321). Решение волнового уравнения (323). Учет пространственной дисперсии и некоторых нелинейных эффектов (329). Учет образования плазменных волн. Взаимодействие между различными нормальными волнами (334). О взаимной трансформации и взаимодействии между продольными и поперечными волнами в плазме (340)

- § 21. Распространение импульсов (сигналов) 344
 Фурье-представление поля импульса (344). Распространение квазимонохроматического импульса без учета его расплывания (346). Фазовая и групповая скорости волн (347). Расплывание импульсов (349). Пределы применимости использованного приближения и более точные результаты (356).
- § 22. Плотность энергии в диспергирующей среде. Скорость сигналов в плазме при наличии поглощения 359
 Введение (359). Плотность энергии в непоглощающей диспергирующей среде (360). Случай поглощающей среды (364). Плотность энергии для модели поглощающей плазмы (367). О плотности энергии в случае совокупности осцилляторов (368). Плотность энергии в плазменных волнах (368). Скорость сигналов в поглощающей среде. Применение к плазме (370).

Глава V

Распространение волн в неоднородной магнитоактивной плазме

- § 23. Введение. Приближение геометрической оптики 373
 Волновые уравнения (373). Приближение геометрической оптики (374). Границы применимости приближения (377). Область начала слоя и взаимодействие нормальных волн в этом случае (380).
- § 24. Распространение импульсов 383
 Вектор групповой скорости в анизотропной среде (383). Случай магнитоактивной плазмы (388). Вектор групповой скорости, направление луча и вектор потока энергии (391). Распространение импульсов в неоднородной среде (396). Распространение импульсов в поглощающей среде (398).
- § 25. Отражение волн от неоднородного слоя 402
 Отражение волн от слоя. Углы $\alpha = 0$ и $\alpha = \pi/2$ (402). Приближенное решение при произвольном угле α (404).
- § 26. Предельная поляризация волн, выходящих из слоя неоднородной магнитоактивной плазмы 410
 Введение. Некоторые оценки (410). Приближенное решение (412). Результаты расчета (417).
- § 27. Поведение поля волны, коэффициенты отражения и прохождения при наличии особенности у показателя преломления . . 419
 Введение. Особенности (полюса) у показателя преломления (419). Строгое решение для слоя $\epsilon'_{\alpha\beta\beta} = \frac{g}{(z+is)^2}$ (422). Строгое решение для слоя $\epsilon'_{\alpha\beta\beta} = \frac{g^2}{z+is}$. Физическая интерпретация (423). Слой $\epsilon'_{\alpha\beta\beta} = g_1^2 + \frac{g_2^2}{z+is}$ (425). Полюс функции $(n-ik)_{1,2}^2$ в случае магнитоактивной плазмы (426). Механизм резонанса. Эффект «разбухания» поля в магнитоактивной плазме (430). Случай земной ионосферы (433). Учет пространственной дисперсии и нелинейных эффектов (434).
- § 28. Эффект «уравнивания» отраженных сигналов (взаимодействие нормальных волн при малых углах α) 434
 Область малых углов α между магнитным полем и волновой нормалью. Картина явления (434). Решение задачи методом возмущений (область очень малых углов α) (437). Вариационный метод (другой предельный случай) (444). Метод фазовых интегралов (452). Общие результаты при $u = \frac{\omega_H^2}{\omega^2} < 1$ (454). Формулы для δ_0 . Учет соударений (457). Результаты при $u = \frac{\omega_H^2}{\omega^2} > 1$ (462).

- § 29. Наклонное падение волн на слой. Теорема взаимности . . . 466
 Введение (466). Приближение геометрической оптики (467). Поле в первом приближении геометрической оптики (469). Графики функций $q_{1,2}(v)$ (472). Траектории волновых нормалей и лучей (475). Некоторые особые случаи (479). Просачивание волн и эффект «утраивания» сигналов при наклонном падении (482). Просачивание волн при $u = \frac{\omega H}{\omega^2} > 1$ (485). Доказательство теоремы взаимности (486). Обобщение на случай магнитоактивной среды (488). Среда с несимметричным тензором μ'_{ij} и с пространственной дисперсией (489).

Глава VI

Отражение радиоволн от ионосферных слоев

- § 30. Введение. Отражение от произвольного плавного слоя . . . 491
 О распространении радиоволн в ионосфере (491). Параметры ионосферы (492). Отражение волн от произвольного слоя (495). Действующая высота отражения z_d . Выотно-частотные характеристики (499). Параболический слой (502). Учет изменений слоя во времени. Эффект Доплера (505).
- § 31. Учет поглощения 508
 Влияние поглощения на отражение волн (508). Коэффициент отражения в случае малости поглощения. Определение $\nu_{\text{эфф}}$ по измерению поглощения (511).
- § 32. Структура поля вблизи точки отражения 513
 Структура поля (513). Геометрикооптическое приближение (515). Учет поглощения (517).
- § 33. Отражение и просачивание через слой волн с частотой, близкой к критической 518
 Параболический слой (518). Произвольный слой (519). Учет поглощения (523). Действующая высота для параболического слоя (строгое решение) (524). О времени установления амплитуды сигнала (527).
- § 34. Отражение при наклонном падении 528
 Точка отражения. Критическая частота (528). Лучевая трактовка (529). Теоремы, связывающие групповые пути при наклонном и нормальном падении (533). Отражение от сферического слоя (536). Напряженность поля отраженных от ионосферы сигналов (537).
- § 35. Отражение волн при учете влияния магнитного поля 541
 Влияние магнитного поля. Критические частоты (541). Фаза волны и коэффициент отражения. Ход лучей (543). Квазипродольное и квазипоперечное распространение (548). Наклонное падение (549). Учет неоднородности земного магнитного поля (550).

Глава VII

Распространение радиоволн в космических условиях

- § 36. Распространение радиоволн в солнечной атмосфере 553
 Введение (553). Солнечная корона (554). Распространение радиоволн в короне (556). Излучение радиоволн. Учет рефракции (561). Уравнение переноса. Эффективная температура радиоизлучения (565). Влияние магнитного поля (568). Трансформация плазменных волн в радиоволны (572). О поглощении, не связанном с соударениями (573). Теорема Кирхгофа в магнитоактивной плазме (574).

§ 37. Распространение радиоволн в межзвездной среде 577

Поглощение радиоволн в межзвездном газе (замечания общего характера) (577). Вычисление коэффициента поглощения в сильно разреженной плазме (579). Вращение плоскости поляризации радиоволн в межзвездной среде (585).

Глава VIII

Нелинейные явления в плазме, находящейся в переменном электромагнитном поле

§ 38. Введение. Плазма в сильном однородном электрическом поле 588

О нелинейных эффектах в плазме со столкновениями и без столкновений (588). Условие слабости поля в плазме. Примеры (590). Постановка задачи в случае сильного поля (591). Элементарная теория (592). Точность результатов элементарной теории (599). Кинетическая теория (600). Сильно ионизированная плазма (604). Слабо ионизированная плазма (606). Изменение концентрации электронов в результате нагрева плазмы в неоднородном поле (608).†

§ 39. Нелинейные эффекты при распространении радиоволн в плазме (ионосфере) 610

Введение (610). Основные соотношения (612). Эффект самовоздействия (613). Нелинейное взаимодействие волн. Кроссмодуляция (618). Нелинейное взаимодействие немодулированных волн. Комбинационные частоты (623). О воздействии радиоволн на ионосферу (625). Нелинейность, связанная с изменением электронной концентрации (626).

Цитированная литература 630

Дополнительная литература 646

Предметный указатель 681