

т. е. среда непоглощающая с отрицательной диэлектрической проницаемостью. Такой случай осуществляется при отражении радиоволн от плазмы (см. § 87).

С л у ч а й 2. $n \neq 0, \kappa = 0$. В этом случае $v = n, \epsilon = n^2 > 0$, т. е. среда прозрачна. Полное отражение будет иметь место при $n < 1$, если φ превосходит предельный угол $\varphi_0 = \arcsin n$ (см. § 66).

§ 74. Аномальный скин-эффект и эффективная диэлектрическая проницаемость

1. Проникновение электромагнитной волны в тонкий поверхностный слой металла есть частный случай *скин-эффекта*, рассмотренного нами в т. III, § 144. Самый слой, в который проникает электромагнитное поле, называется *скин-слоем*. Толщина скин-слоя определяется формулой (72.5). Она выводится на основе макроскопических уравнений Максвелла (71.5). Из тех же уравнений следует, что напряженность поля в скин-слое убывает *экспоненциально*. Такой скин-слой называется *нормальным*.

Для применимости макроскопических уравнений Максвелла необходимо, чтобы *межатомные расстояния были малы по сравнению не только с длиной волны, но и с толщиной скин-слоя*. Это условие можно считать выполненным для всех металлов. Более жестким является условие применимости понятия диэлектрической проницаемости $\epsilon(\omega)$, как оно было введено в § 71. Там было учтено, что электроны и ионы, движением которых создаются токи проводимости и поляризации, движутся в электрическом поле, которое меняется во времени, но не было принято во внимание его *изменение в пространстве*. Это допустимо, когда *средняя длина свободного пробега электронов мала по сравнению с расстояниями, на которых заметно меняется напряженность электрического поля, т. е. по сравнению с длиной волны и толщиной скин-слоя*. Только тогда электрон от столкновения до столкновения движется практически в однородном поле. Если же средняя длина свободного пробега электрона порядка или больше толщины скин-слоя или длины волны, то результаты § 71 требуют пересмотра. Понятие диэлектрической проницаемости $\epsilon(\omega)$ может потерять смысл. Тогда напряженность поля и ток будут убывать вглубь металла *не экспоненциально*, а по более сложному закону. Соответствующий скин-эффект называется *аномальным*.

Если воспользоваться значениями κ из табл. 7, то легко убедиться, что у всех металлов, приведенных в этой таблице, величина $h = \lambda/(4\pi\kappa)$ для видимого света порядка 10^{-6} см. Того же порядка при комнатных температурах и средняя длина свободного пробега электронов. Это указывает на аномальный характер скин-эффекта. Только для плохих проводников, у которых длина свободного пробега меньше, скин-эффект при комнатных температурах нормальный. В области же низких температур, где средняя длина свободного пробега достигает для очень чистых образцов значений порядка

10^{-2} — 10^{-3} см, об использовании теории нормального скин-эффекта, основанной на понятии диэлектрической проницаемости, не может быть и речи. Поскольку характер скин-эффекта определяется соотношением между средней длиной свободного пробега электрона и толщиной скин-слоя, полная теория аномального скин-эффекта должна строиться на основе *кинетики электронов*, в ее квантовой форме.

2. Однако независимо от того, является ли скин-эффект нормальным или аномальным, отражение света возникает в результате излучения электромагнитных волн токами, текущими в поверхностном слое металла и возбуждаемыми падающей волной. Механизм отражения света от металлов вполне аналогичен соответствующему механизму для диэлектриков, разобранный в §§ 68 и 69. В случае нормального скин-эффекта плотность полного тока убывает вглубь металла по экспоненциальному закону. В случае аномального скин-эффекта это не так. Однако, если толщина скин-слоя много меньше длины волны, конкретный закон изменения плотности тока в поверхностном слое может лишь слабо сказаться на отражении света, так как в этом случае фазы источников вторичных волн, распределенных в поверхностном слое, практически одинаковы по всей его толщине. Поэтому при вычислении поля отраженной волны действительное распределение полного тока в скин-слое может быть заменено распределением, в котором плотность тока убывает экспоненциально. Такая замена эквивалентна введению вместо ϵ *эффективной диэлектрической проницаемости металла* $\epsilon_{эф}$.

Пользуясь величиной $\epsilon_{эф}$, можно вычислять поле отраженной волны так, как если бы скин-эффект был нормальным, а металл имел диэлектрическую проницаемость $\epsilon = \epsilon_{эф}$. Однако, если скин-эффект аномальный, пользоваться $\epsilon_{эф}$ для вычисления поля внутри металла нельзя: термин «эффективная» понимается в смысле: *эффективная в отношении отражения*. Эффективная диэлектрическая проницаемость, очевидно, может быть введена и в случае более толстых скин-слоев. Однако в этих случаях она, вообще говоря, зависит от состояния поляризации падающей волны и от угла падения. Для теоретического вычисления $\epsilon_{эф}$ надо было бы решить задачу об отражении света методами кинетики и статистики, что далеко выходит за рамки этой книги.