

О НЕЛИНЕЙНЫХ ОТКЛОНЕНИЯХ НАПРАВЛЕНИЯ ОТРАЖЕННОЙ ВОЛНЫ В ВАКУУМЕ НА ГРАНИЦЕ С ПЛАЗМОЙ

Б. Чакраборти

Одним из нелинейных эффектов, возникающих при распространении электромагнитной волны в плазме, является возрастание волнового числа в третьем приближении решения задачи с граничными условиями, когда электромагнитная волна наклонно падает на границу раздела из вакуума и возбуждает только поперечные волны в полубесконечной плазме [1 – 4]. Это дает возможность получения некоторых нелинейных волн, генерируемых на границе и распространяющихся в вакууме вдоль направлений, слабо отличающихся от направления распространения отраженной волны; в действительности эти направления лежат внутри конуса, ось которого совпадает с направлением распространения отраженной волны. Вертикальный угол конуса, т.е. максимальный угол отклонения, является величиной второго порядка и пропорционален квадрату амплитуды падающей волны. В плазме Власова, обладающей только собственным электромагнитным полем, первая гармоника поперечной волны генерирует (в третьем приближении) волны первой и третьей гармоник с амплитудами, пропорциональными кубу амплитуды линейной волны [3, 4]. Возрастание волнового числа следует также из решения в третьем приближении и пропорционально квадрату амплитуды линейной волны.

Равенство фаз волн в вакууме и плазме на границе дает:

$$\omega \cos \alpha = kc \cos \beta,$$

где k – волновое число, ω – частота, α – угол наклона падающей волны (или отраженной волны в линейном приближении) с осью ox (см. рисунок) и β – то же самое, что α , для поперечной прошедшей волны. В третьем приближении для генерированных нелинейных волн мы получаем условие:

$$\omega \cos \alpha' = k'c \cos \beta',$$

где $\alpha' = \alpha + \delta \alpha$, $k' = k + \delta k$ и $\beta' = \beta + \delta \beta$.

Следовательно,

$$\omega \sin \alpha \delta \alpha = c(k \sin \beta \delta \beta - \delta k \cos \beta)$$

и $\delta \alpha$ есть угол отклонения направления распространения нелинейной волны, генерируемой плазмой в вакуум, от направления распространения отраженной волны. Нелинейные волны, рассмотренные в [3] и [4], зависят от условия:

$$\delta \alpha = 0, \quad \delta \beta = (\delta k/k) \operatorname{ctg} \beta.$$

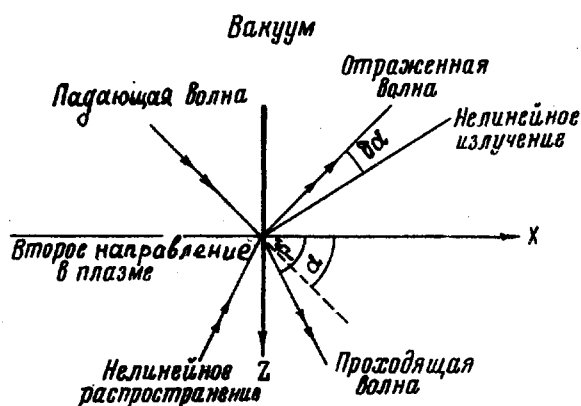
Если $\delta\beta \neq (\delta k/k)\text{ctg}\beta$, то $\delta\alpha \neq 0$ и $\delta\alpha$ может рассматриваться как отклонение от законов геометрической оптики, обусловленное нелинейностью точной теории. Из результатов [3] максимальное значение $\delta\alpha$, полученное при $\delta\beta = 0$, дается соотношением:

$$(\delta\alpha)_{\max} = \frac{-\delta k}{k} \frac{kc}{\omega} \frac{\cos\beta}{\sin\alpha} = E^2 \left(\frac{e}{mc} \right)^2 \frac{\cos\beta}{\sin\alpha} \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{16\omega H},$$

которое получено в приближении холодной плазмы, где E — есть амплитуда прошедшей нелинейной волны. Нужно заметить, что нелинейная волна, генерируемая в вакууме, не называется отраженной волной как в случае линейного приближения, так как она не обусловлена отражением в классическом смысле, а генерируется излучением плазмы, как результат взаимодействия между падающей волной и плазмой.

Генерируемые в вакууме волны, удовлетворяющие условию $\delta\alpha \neq 0$ на границе имеют фазы, отличные от фазы падающей волны, и поэтому эти волны должны рассматриваться независимо, а не параллельно с первой гармоникой линейного приближения. Источником линейных волн является волна, распространяющаяся в вакууме, тогда как для прошедших нелинейных волн такого источника не существует, так как они образуются в результате взаимодействия между падающей волной и нелинейной плазмой. Из равенства фаз на границе следует, что имеется только два направления распространения волн на каждую сторону от границы, и распространение волны в противоположном направлении даже теоретически абсурдно. Частота, амплитуда и направление падающей волны определяются свойствами источника волн, а не свойствами нелинейной плазмы, поэтому возможности получения в вакууме волн в направлении распространения падающей волны исключены. Следовательно, единственно возможным теоретически направлением является то, которое образует угол $\alpha + \delta\alpha$ с ox , где $\delta\alpha$ есть угол отклонения от распространения линейной отраженной волны. По ту сторону от границы, где находится плазма, равенство фаз определяет направление прохождения волны и направление излучения к границе, которое лежит в плоскости падения волны симметрично с направлением прошедшей волны по отношению к нормали. Мы будем называть это направление вторым направлением в плазме (см. рисунок). Из двух граничных оптических условий (а именно — непрерывности тангенциальных компонент электрического и магнитного полей) можно определить амплитуды этих нелинейных поперечных волн, которые распространя-

ются вдоль двух следующих направлений для каждой первой или третьей гармоник: 1) направление излучения в вакууме и 2) направление распространения вдоль второго направления в плазме. Можно легко показать, что предположение о существовании волн, распространяю —



Схематическое изображение нелинейных волн вместе с линейными волнами на границе плазма — вакуум

щихся вдоль второго направления в плазме, не нарушает факта прохождения нелинейных волн через нижнюю границу плазменного слоя.

В заключение автор выражает глубокую благодарность профессору А.А.Власову (физический факультет МГУ) за полезное руководство.

Джадавпурский университет
математическое отделение
Калькутта, Индия

Поступило в редакцию
5 августа 1968 г.

Литература

- [1] D. A. Tidman, H. M. Stainer. Phys. Fluids, 8, 345, 1965.
- [2] F. W. Stuister, D. Montgomery. Phys. Fluids, 8, 551, 1965.
- [3] Б.Чакраборти. Вестник МГУ, сер. Физика и астрономия, № 4, 3, 1967; № 5, 99, 1967.
- [4] Б.Чакраборти. Кандидатская диссертация, Физический факультет, МГУ, 1967.