

ОТВЕТ НА КОММЕНТАРИЙ С.К.СЕКАЦКОГО, Г.ДИТЛЕРА

Т.И.Кузнецова¹⁾

Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН

117924 Москва, Россия

Поступила в редакцию 25 ноября 1999 г.

PACS: 42.72.Bj, 42.79.Gn

Ниже приводятся некоторые дополнительные детали и формулы, поясняющие справедливость выводов, сделанных в статье [1].

1. В [1] рассматривалась волна вида $E = AJ_1(q\rho) \exp(pz)$.²⁾ Предполагалось, что волновод круглый, стенки его – идеально отражающие. Для наблюдаемого монохроматического поля принималось выражение $\text{Re}\{E \exp(-i\omega t)\}$. При таком выборе временного множителя диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 1 - i\delta$ при $\delta > 0$ означала усиление. Показатель экспоненты в p определялся формулой

$$p \equiv p' + ip'' = \sqrt{q^2 - (\omega^2/c^2) + i\delta(\omega^2/c^2)}. \quad (1)$$

На основе этого выражения уже можно говорить о совпадении знаков p' и p'' , поскольку возведение обеих сторон равенства (1) в квадрат и сопоставление мнимых частей дает $2p'p'' = \delta(\omega^2/c^2)$. Таким образом, в усиливающем волноводе интенсивность нарастает в направлении распространения волны.

Приведем более подробные формулы для p' и p'' . Обозначая через a_{cr} радиус критического (для частоты ω) волновода, а через a – текущий радиус, положим:

$$q \frac{c}{\omega} \equiv \frac{q}{q_{cr}} = \frac{a_{cr}}{a}. \quad (2)$$

Используя переобозначение (2), получаем корни из комплексного числа (1) в виде

$$p'_{(1)} \frac{c}{\omega} = \sqrt{\sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{a_{cr}}{a}\right)^4 + \delta^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{a_{cr}}{a}\right)^2}, \quad (3a)$$

$$p''_{(1)} \frac{c}{\omega} = (\text{sgn}(\delta)) \sqrt{\sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{a_{cr}}{a}\right)^4 + \delta^2} - \frac{1}{2} \left(\frac{a_{cr}}{a}\right)^2}, \quad (3b)$$

$$p'_{(2)} = -p'_{(1)}, \quad p''_{(2)} = -p''_{(1)}. \quad (4)$$

В (3) всюду подразумеваются арифметические значения корней. Приведенные решения (3) и (4) совершенно равноправны – вопреки утверждению из комментария – и нет никаких оснований предпочесть одно из них. Приведенные в статье зависимости величин $p'_{(1)}c/\omega$ и $p''_{(1)}c/\omega$ от безразмерного радиуса a/a_{cr} были построены именно по этим формулам. Сами же формулы в статью включены не были ради краткости текста. Графики были приведены для первого решения (формулы (3)). Этот выбор

¹⁾ e-mail: tkuzn.©sci.lebedev.ru

²⁾ Здесь J_1 – функция Бесселя первого порядка. В комментарии ошибочно используется функция J_0 , не удовлетворяющая уравнению (1) из комментария, или уравнению (1) из [1].

был связан только с удобством компоновки рисунков. При обсуждении рисунков было сказано, что для второго решения каждая из величин p' и p'' сменит знак.

Авторы комментария настаивают на том, что первое из полученных решений (формулы (3)) следует отбросить, а второе (формулы (4)) – оставить как “единственное физически разумное”. Но пока сохраняется симметрия задачи, выделить одно из решений нельзя. При замене $z \rightarrow -z$ решения переходят друг в друга, а волновод – сам в себя. Примечательно здесь не то, что одна из волн нарастает по оси z . Важно, что для каждой из волн рост интенсивности и движение поверхности постоянной фазы происходят в одинаковом направлении (знаки p' и p'').

2. Комментарий вскользь касается проблемы сопряжения волновода со свободным пространством. Эта проблема, несомненно, важна: для практических устройств интерес представляет не только прохождение волны по волноводу, но и отражение на стыках конечного отрезка волновода с прилегающими элементами оптического тракта. Эти вопросы представляют собой самостоятельную задачу и не могли быть объединены с другой задачей в рамках короткой публикации. Пути согласования закритического усиливающего волновода с другими оптическими элементами сейчас исследуются. Отмечу, что результаты исследования могут повлиять только на входные амплитуды волн в волноводе, но не на инкремент и движение фазового фронта, которые изучались в [1].

3. Относительно поглощающего волновода следует сказать, что, вопреки высказанным в комментарии сомнениям, здесь, как и в усиливающем волноводе, волновой вектор почти перпендикулярен стенкам и имеет малую продольную компоненту. Для пояснения рассмотрим поток электромагнитной энергии, связанный с волной. Для изучаемой TE_{01} волны он составляет

$$S_z = \frac{c^2}{16\pi\omega} i \left(E \frac{\partial E^*}{\partial z} - E^* \frac{\partial E}{\partial z} \right). \quad (5)$$

С помощью выражения для E и формулы (5) находим

$$S_z = \frac{c^2}{8\pi\omega} p'' |A|^2 [J_1(q\rho)]^2 \exp(2p'z). \quad (6)$$

Из (6) следует, что при $p'' > 0$ поток положителен, то есть направлен в сторону роста интенсивности (знаки p' и p''). В поглощающей среде эти направления противоположны. В обоих случаях величина потока пропорциональна малой величине p'' , содержащей малый параметр δ . При $\delta = 0$ поток обращается в нуль. Выражение для потока лишней раз подтверждает, что в случае усиления рассматриваемые волны являются распространяющимися и нарастающими по направлению распространения (в случае поглощения – затухающими по этому направлению). Так что свойства волн активного волновода были получены и представлены правильно.