

Рис.1

При изменении координаты x на длину волны λ значение «чего-то» вовсе не должно измениться (рис.1). Это значит, что фаза меняется на 2π . Следовательно, длина волнового вектора равна $k = 2\pi/\lambda$.

Заметим, формулы (1) и (2) описывают зависимость «чего-то» во всем пространстве. Простейшая волна заполняет собой все пространство. Задумайтесь, как трудно было поверить, что свет распространяется в виде волн...

Если зафиксировать время ($t = t_0$) и значение фазы ($\varphi = \varphi_0$), то получим

$$x = \frac{\lambda}{2\pi}(\omega t_0 - \varphi_0)$$

при произвольных значениях координат y и z . Другими словами, во всей плоскости

$$x = \frac{\lambda}{2\pi}(\omega t - \varphi)$$

фаза одна и та же. Ее так и называют плоскостью равной фазы, а волну называют плоской. Так как волна имеет вполне определенную частоту, к ее наименованию добавляют прилагательное «монохроматическая». Волны (1) и (2) – плоские монохроматические волны.

Теперь «освободим» время, а фазу будем «держат» равной φ_0 . Тогда

$$x = \frac{\lambda}{2\pi}(\omega t - \varphi_0). \quad (3)$$

Мы видим, что плоскость равной фазы перемещается со скоростью, равной $\lambda\omega/(2\pi)$. Ее называют фазовой скоростью. Итак,

$$u_{\text{фаз}} = \frac{\omega}{k} \quad (4)$$

есть скорость распространения фазы волны.

Задумаемся: может ли плоская монохроматическая волна переносить сигналы и/или энергию из одной точки пространства в другую? Боюсь, многим вопрос покажется странным: все знают, что основную информацию нам приносят радиовол-

ны, а телевизор или радиоприемник их лишь расшифровывают, делая информацию доступной органам чувств – зрению, слуху.

И все же правильный ответ на заданный вопрос: нет! Плоская монохроматическая волна переносит ни энергию, ни какой-либо сигнал не может. Согласно определению, она не только заполняет все пространство, но и всегда его заполняла и будет всегда заполнять (формула (1) справедлива не только при любом значении координаты, но и при любом значении времени).

Переносить сигналы и энергию могут только более сложные образования из волн. Например, пакеты (группы) волн (рис.2). Пакет надо создать так, чтобы он был в пространстве ограничен. Тогда, перемещаясь в пространстве, пакет волн будет переносить информацию и энергию. Скорость распространения пакета волн не всегда совпадает с фазовой скоростью волны. Можно показать, что скорость распространения пакета, или группы, волн равна

$$u_{\text{гр}} = \frac{d\omega}{dk}. \quad (5)$$

Ее так и называют групповой скоростью. Фазовая скорость может быть сколь угодно большой и, тем самым, служить примером сверхсветовой скорости. Групповая же скорость, в согласии с теорией относительности, не может превышать скорость света в пустоте ($u_{\text{гр}} \leq c$).

Для электромагнитных волн в пустоте существует простое соотношение, связывающее частоту ω и волновой вектор \vec{k} :

$$\omega = ck, \quad (6)$$

где, повторим, $c = 299792458$ м/с – скорость света в пустоте, одна из фундаментальных физических констант (значение взято из статьи «Фундаментальные физические константы»). Формулы (4)–(6) показывают, что в пустоте фазовая и групповая скорости электромагнитных волн совпадают: обе равны c .

Соотношение (6) столь привычно, что я его назвал простым соотноше-

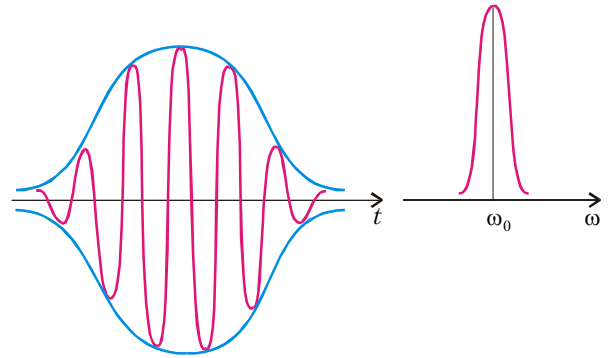


Рис.2

нием. Научное открытие превращает чудо в тривиальность – эта мысль принадлежит Эйнштейну. Соотношение (6) открыл великий Дж.Максвелл, сформулировав свои знаменитые уравнения (уравнения Максвелла) электромагнитного поля. Причем константа c появилась в уравнениях Максвелла не как скорость света, а как величина, входящая в соотношения, связывающие изменение магнитного поля с изменением электрического и наоборот. Ее величину можно определить независимо от оптических измерений: например, по возникающей разности потенциалов при пересечении проводником линий магнитной индукции.

Небольшое отступление (а к волнам в волноводе мы еще вернемся).

Когда свет распространяется в прозрачной среде, соотношение (6) несколько усложняется:

$$\omega = \frac{c}{n}k. \quad (7)$$

Величину n мы уже упоминали: это показатель преломления. Почему он так называется? Потому что от него зависит преломление света на границе двух сред. Наверное, все вы помните опыт Ньютона, показавшего, что солнечный свет представляет собой смесь разных цветов. Опыт продемонстрировал не только то, что солнечный свет состоит из различных цветов, но и то, что каждый из них преломляется по-своему. Это означает, что показатель преломления зависит от цвета, т.е. от частоты: показатель преломления n есть функция частоты ($n = n(\omega)$).

Ранее записанные формулы (4)–(7) дают возможность вычислить фазовую и групповую скорости:

$$u_{\text{фаз}} = \frac{c}{n}, \quad u_{\text{гр}} = \frac{c}{n + \omega \frac{dn}{d\omega}}. \quad (8)$$