

Федеральное агентство связи

**Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования**

**ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ**

ЭЛЕКТРОННАЯ БИБЛИОТЕЧНАЯ СИСТЕМА

Самара

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО СВЯЗИ
ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ
КАФЕДРА ФИЗИКИ

МЕТОДИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА

к выполнению лабораторной работы №206 по химии радиоматериалов
«Определение показателя преломления стекла с помощью микроскопа»
для студентов II курса очного и заочного отделения
по специальностям: 210400, 210401, 210402, 210403, 210404, 210405, 210406,
210302

Составители: к.ф.-м.н., доц. Матвеев И.В.
к.б.н., доц. Картавых Т.Н.
Редактор: к.ф.-м.н., доц. Матвеев И.В.
Рецензент: д.т.н., проф. Сподобаев Ю.М.

Самара
ПГУТИ
2010

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 206

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СТЕКЛА С ПОМОЩЬЮ МИКРОСКОПА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить оптические свойства материалов для оптоэлектронных приборов и волоконно-оптических линий связи.

ЛИТЕРАТУРА

(основная)

1. *Глинка Г.Л.* Общая химия. — М.: Интеграл-Пресс, 2006.
2. *Пасынков В.В.* Материалы электронной техники: Учебник для вузов / В.В.Пасынков, В.С.Сорокин. — 5-е изд., стереотип. — СПб.: Лань, 2003.
3. *Савельев И.В.* Курс общей физики. Кн. 4. Волны. Оптика. — М.: ООО «Астрель»: ООО «АСТ», 2003.

(дополнительная)

4. *Детлаф А.А., Яворский Б.М.* Курс физики. — М.: Академия, 2005.

ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

1. При подготовке к выполнению лабораторной работы и к её защите необходимо изучить указанный материал по основной литературе и настоящему описанию лабораторной работы.
2. Изучение рационально строить в соответствии с приведёнными ниже контрольными вопросами.
3. Подготовить бланк отчёта по лабораторной работе, где необходимо указать:
 - a) цель работы;
 - b) основные расчётные соотношения;
 - c) таблицы для результатов измерений.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите технологию получения стёкол.
2. Какие химические вещества используются в качестве сырья для изготовления стёкол?
3. Объясните понятие «интервал размягчения».
4. Какие свойства стёкол зависят от их химического состава?
5. Перечислите свойства кварцевого стекла.
6. Какие химические вещества используют в качестве технологических добавок в производстве стёкол?

7. Как влияют технологические добавки на характеристики стёкол?
8. От каких факторов зависит электрическая прочность стёкол?
9. Классификация стёкол по техническому назначению. Охарактеризуйте каждую группу.
10. Ситаллы. Состав. Свойства, получение, применение.
11. Перечислите основные характеристики диэлектриков и стёкол.
12. Что представляет собой свет?
13. Напишите уравнение плоской монохроматической электромагнитной волны.
14. Сформулируйте законы отражения и преломления света.
15. Каков физический смысл абсолютного и относительного показателя преломления?
16. Каким соотношением связаны между собой относительный показатель преломления двух сред с абсолютными показателями преломления этих сред и скоростями света в данных средах?
17. Выведите расчётную формулу по определению показателя преломления стекла с помощью микроскопа.
18. Объясните порядок выполнения работы и оцените погрешности измерений.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: оптический микроскоп, микрометр, линейка, измеряемые образцы в виде стеклянных пластинок.

Для определения показателя преломления веществ существуют различные методы. К наиболее простому из них относится метод определения показателя преломления стекла при помощи микроскопа. В основе метода лежит явление кажущегося поднятия точки A в точку A' , которое происходит вследствие преломления световых лучей, при наблюдении точки A сверху нормально к поверхности стеклянной пластины (рис. 1).

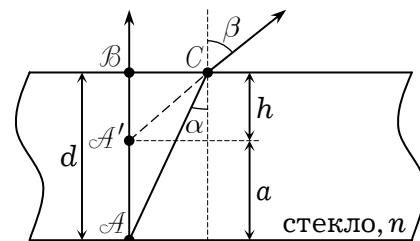


Рис. 1

Пусть толщина пластины d , а её показатель преломления n . Выберем два луча, исходящих из точки A , находящейся на нижней поверхности пластины: луч AB , идущий по нормали к плоскости пластины и луч AC , близкий к нормали. Луч AB проходит сквозь стекло и выходит в воздух в точке B , не испытывая преломления, а луч AC , падающий на верхнюю поверхность пластины под углом α , выходит из неё под углом β ($\beta > \alpha$). Если продолжить преломлённый луч до пересечения с лучом AB , то получим точку A' . Следовательно, рассматривая точку A под углом β через стеклянную пластинку, мы видим её мнимое изображение в точке A' . Таким образом, точка A покажется нам расположенной

ближе на величину $a = AA'$, где a — величина кажущегося поднятия (в этом случае и толщина пластины покажется меньше истинной) или поднятия видимого изображения точки A .

Установим связь между величиной a , показателем преломления стекла n и толщиной пластины d . Запишем закон преломления света на границе раздела двух сред: стекло-воздух

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_{\text{возд}}}{n},$$

где $n_{\text{возд}} \approx 1$ — абсолютный показатель преломления воздуха.

Ввиду малости углов α и β , заменяя синусы тангенсами, имеем

$$\frac{\text{tg } \alpha}{\text{tg } \beta} \approx \frac{1}{n}.$$

Из последнего равенства получим

$$n = \frac{\text{tg } \beta}{\text{tg } \alpha}.$$

Из треугольников $\triangle BA'C$ и $\triangle BAC$ следует

$$\text{tg } \beta = \frac{BC}{BA'}, \quad \text{tg } \alpha = \frac{BC}{BA}.$$

Тогда

$$n = \frac{\text{tg } \beta}{\text{tg } \alpha} = \frac{BA}{BA'} = \frac{d}{h}.$$

Учитывая, что $h = d - a$, имеем

$$n = \frac{d}{d - a}.$$

Таким образом, измерив толщину d и величину кажущегося поднятия a (или величину h), можно определить показатель преломления стекла n .

Установка состоит из оптического микроскопа с микрометрическим винтом, микрометра, трёх стеклянных пластинок и линейки.

Микроскоп предназначен для измерения величины a и величины h . Толщину стеклянной пластинки измеряют микрометром в нескольких местах. Обычно для этого используются четыре угла и центр пластинки.

На нижней и верхней поверхностях одной из пластин нанесены метки (штрихи). Точка A принадлежит к нижней метке.

Прежде чем приступить к выполнению работы, нужно определить цену деления круговой шкалы микрометрического винта, т.е. выяснить, какой величине перемещения тубуса соответствует поворот на одно деление. Для этого нужно измерить линейкой высоту поднятия тубуса Δh при одном полном обороте и разделить полученную высоту в «мм» на число делений N на круговой шкале микрометрического винта. Тогда, цена деления в «мм» будет равна

$$\frac{H - H_0}{N} = \frac{\Delta h}{N} \left(\frac{\text{мм}}{\text{дел}} \right).$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Показатель преломления стекла в данной работе может быть найден двумя способами.

1 способ

1. Провести измерения толщины пластинки при помощи микрометра. Измерения лучше провести в четырёх углах прямоугольной пластинки и в центре.
2. Поместить исследуемую пластинку с метками на предметный столик микроскопа по центру объектива.
3. Наблюдая в окуляр и перемещая тубус микроскопа, получить чёткое изображение верхней метки (точка *B*). Сделать отсчёт по микрометрическому винту.
4. Перемещая снова тубус микроскопа микрометрическим винтом добиться чёткого изображения нижней метки (точка *A*). Снять показания микрометрического винта. Разность отсчётов микрометрического винта равна $h = d - a$ (рис. 2).
5. Измерения повторить пять раз. Результаты измерений занести в таблицу 1.
6. Найти показатель преломления по формуле

$$n = \frac{\langle d \rangle}{\langle h \rangle},$$

предварительно измерив микрометром толщину пластины в разных местах не менее 5 раз.

6. Расчёт абсолютной погрешности измерений:

- а) рассчитать абсолютную погрешность Δd по методу прямых измерений Стюдента; б) абсолютную погрешность Δh принять равной цене деления шкалы микрометрического винта. в) абсолютную погрешность Δn рассчитать как погрешность при косвенном измерении:

$$\Delta n = \sqrt{\left(\frac{\partial n}{\partial d}\right)^2 (\Delta d)^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial h}\right)^2 (\Delta h)^2} = \frac{1}{h^2} \sqrt{h^2 (\Delta d)^2 + d^2 (\Delta h)^2}.$$

Таблица 1

№	Отсчёты по шкале				$\langle h \rangle$, мм	Δh , мм	Толщина стекла			$n \pm d/n$	Δn	$n \pm \Delta n$
	Первый отсчёт, N_1	Второй отсчёт, N_2	h_i , дел	h_i , мм			d_i , мм	$\langle d \rangle$, мм	Δd , мм			

2 способ

1. Провести измерения толщины пластинки при помощи микрометра. Измерения лучше провести в четырёх углах прямоугольной пластинки и в центре.

2. Взять пластинку с меткой на одной из поверхностей, положить её на предметный столик микроскопа меткой вверх и перемещением тубуса добиться чёткого изображения метки в микроскопе, после чего снять показания по метрическому винту N_1 .

3. Взять пластинку без метки и наложить на пластинку с меткой. Перемещая тубус микроскопа с помощью микрометрического винта, получить резкое изображение метки и произвести отсчёт по микрометрическому винту N_2 . Разность отсчётов по микрометрическому винту $N_2 - N_1$ равна кажущемуся поднятению a .

4. Измерения повторить не менее пяти раз. Результаты измерений занести в таблицу 2.

5. Измерить микрометром толщину пластинки без метки в разных местах не менее 5 раз. Результаты измерений занести в таблицу.

6. Подсчитать показатель преломления стекла по формуле

$$n = \frac{\langle d \rangle}{\langle d \rangle - \langle a \rangle}.$$

7. Расчёт абсолютной погрешности измерений:

а) рассчитать абсолютную погрешность Δd по методу прямых измерений Стьюдента; б) абсолютную погрешность Δh принять равной цене деления шкалы микрометрического винта; в) абсолютную погрешность Δn рассчитать по методу косвенных измерений:

$$\Delta n = \sqrt{\left(\frac{\partial n}{\partial d}\right)^2 (\Delta d)^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial a}\right)^2 (\Delta a)^2} = \frac{\sqrt{a^2 (\Delta d)^2 + d^2 (\Delta a)^2}}{(d - a)^2}.$$

Таблица 2

№	Отсчёты по шкале					$\langle a \rangle$, мм	Δa , мм	Толщина стекла			$n = d/(d - a)$	Δn	$n \pm \Delta n$
	Первый отсчёт, N_1	Второй отсчёт, N_2	a_i , дел	a_i , мм	d_i , мм			$\langle d \rangle$, мм	Δd , мм				

ПРИЛОЖЕНИЕ

Диэлектрики

Диэлектрики — это вещества, которые обладают следующими свойствами:

- 1) Большое удельное сопротивление $\rho = 10^{10} \div 10^{20}$ Ом/см;
- 2) E — электрическая прочность или пробивное напряжение [В/см];
- 3) Диэлектрическая проницаемость ε . В одних случаях она мала: 1, 2, 3... в других случаях (для конденсаторов) 40, 80 и более;
- 4) Тангенс угла диэлектрической потери ($\operatorname{tg} \delta$).

Диэлектрическими свойствами обладают вещества, которые имеют либо ковалентную решётку, при очень маленьких радиусах атома (С (алмаз)), либо ионную решётку с большой долей ионности и с малыми дефектами кристаллической решётки.

Неорганические стёкла. Механизм получения стёкол

Стёкла — неорганические квазиаморфные твёрдые вещества, в которых при наличии ближнего порядка отсутствует дальний порядок в расположении частиц.

Свойства диэлектриков проявляют стёкла в состав которых входят оксиды: SiO_2 , V_2O_5 , GeO_2 , P_2O_5 . Широко распространены силикатные стёкла (SiO_2) обладающие высокой химической устойчивостью.

Сырьем для изготовления стёкол служат: кварцевый песок SiO_2 , сода Na_2CO_3 , поташ K_2CO_3 , известняк CaCO_3 , доломит $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$, бура $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, полевой шпат $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot \text{K}_2\text{O}$ и др. В состав силикатных стёкол вводят окислы щелочных или щелочно-земельных металлов с целью получения определённых физических свойств, а также в технологических целях.

Сырьё измельчают, смешивают в определенных пропорциях, полученную смесь (шихту) помещают в стекловарочную печь. При нагревании из шихты удаляются: H_2O , CO_2 , SO_3 , в результате плавления и химических реакций образуется однородная стекломасса. Формовка изделий осуществляется различными методами: выдувание, центробежное литье, вытяжка, прессование, отливка и т.п. Для получения стеклообразного состояния материала необходимо быстрое охлаждение стекломассы, чтобы исключить частичную кристаллизацию, ведущую к потере прозрачности и однородности.

Сформованные стеклянные изделия подвергают отжигу для устранения механических напряжений, возникших при быстром и неравномерном остывании. Изделия нагревают до определённой температуры и медленно охлаждают.

Для стёкол характерно наличие температур текучести T_T и стеклования T_c . Стёкла при температурах выше T_T проявляют свойства жидкостей, а при температуре ниже T_c стёкла становятся хрупкими. Интервал температур между T_T и T_c — интервал размягчения. Для силикатных стёкол интервалы размягчения меняются от $400 \div 600^\circ\text{C}$ до $700 \div 900^\circ\text{C}$. Ширина интервала размягчения влияет на технологичность стекла.

Зависимость свойств стёкол от их химического состава

Силикатные стёкла по составу, а в связи с этим и по электрическим свойствам (тангенсу угла диэлектрических потерь и удельной проводимости) можно подразделить на три группы.

1. **Бесщелочные стёкла** (отсутствуют окислы натрия и калия) — чисто кварцевое стекло. Обладает высокой нагревостойкостью, сильными электрическими свойствами, трудно изготавливать изделия, особенно сложной конфигурации и с малыми допусками по размерам.

2. **Щелочные стёкла:** а) натриевые; б) калиевые и калиево-натриевые — большинство обычных стекол. Обладают пониженной нагревостойкостью и пониженными электрическими свойствами.

3. **Щелочные стёкла с высоким содержанием тяжелых окислов** (например, силикатно-свинцовые и бариевые): повышенные электрические свойства, приближающиеся при нормальной температуре к электрическим свойствам стёкол первой группы.

Силикатные стёкла устойчивы к действию кислот, за исключением плавиковой кислоты HF , которая их растворяет; стойкость этих стёкол к щелочам значительно меньше.

Кварцевое стекло получают из чистой двуокиси кремния при температурах выше 1700°C . Основу микроструктуры кварцевого стекла составляют кремний-кислородные тетраэдры $[\text{SiO}_4]^{4-}$, соединяясь друг с другом через кислородные ионы, образуют сплошные трёхмерные сетки. Дальний порядок в расположении тетраэдров отсутствует (аморфное тело). Кварцевое стекло можно рассматривать как неорганический пространственный полимер. Кварцевое стекло имеет наименьшее значение температурного коэффициента линейного расширения α_t из всех известных веществ вообще; у остальных стёкол значение α_t , в $10 \div 20$ раз больше. Кварцевое стекло обладает очень высоким пределом прочности на сжатие (до 2100 МПа), который в $4 \div 5$ раз превышает предел прочности на сжатие других стёкол. Предел прочности при растяжении кварцевого стекла хотя и выше, чем у других стёкол, но существенно ниже по сравнению с пределом прочности на сжатие. Он составляет около 60 МПа. Высокая механическая прочность в сочетании с малым температурным коэффициентом линейного

расширения обуславливают высокую стойкость кварцевого стекла к тепловым импульсам.

Кварцевое стекло отличается высокой прозрачностью для излучения в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной области спектра вплоть до длины волны порядка 4 мкм. Поэтому оно является ценным оптическим материалом; из него изготавливают линзы, призмы, оптические окна, баллоны ламп ультрафиолетового излучения и др. По электрическим свойствам кварцевое стекло относится к хорошим высокочастотным диэлектрикам ($\epsilon = 3.8$; $\rho > 10^{16}$ Ом·м; $\text{tg } \delta = 2 \cdot 10^{-4}$ — на частоте 10^6 Гц).

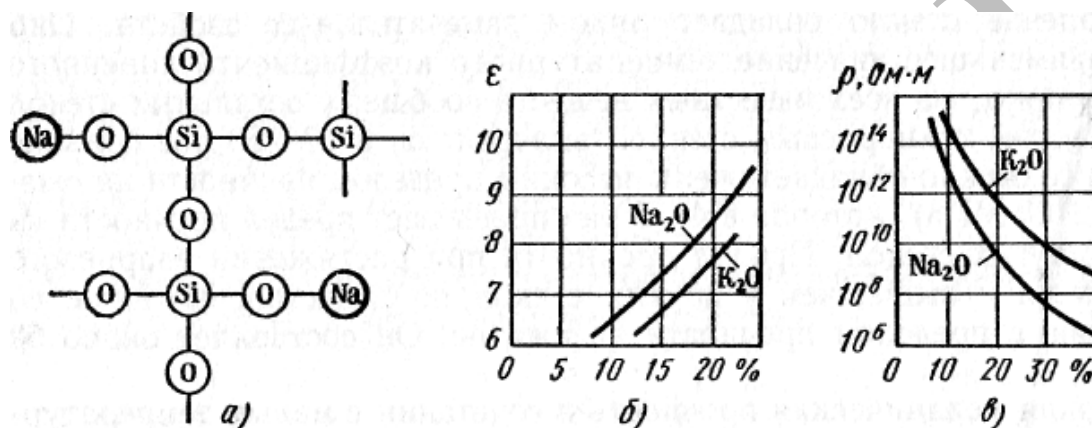


Рис.1. Влияние щелочных окислов на структуру (а) и свойства (б,в) силикатных стёкол (по оси абсцисс отложено содержание Na_2O или K_2O в процентах по массе)

Для улучшения технологических характеристик в состав стёкол вводят окислы щелочных металлов. При этом существенно ухудшаются электрические свойства стёкол: снижается удельное сопротивление, возрастают диэлектрические потери. Отрицательное влияние щелочных окислов на электрические свойства силикатных стёкол обусловлено изменениями в структуре материала, сводящимися к разрыхлению пространственной сетки и образованию тупиковых ветвей (рис. 1,а). Разрыхление кислородного каркаса (обрыв связей) вызывает понижение температуры размягчения стекла. С другой стороны, слабо связанные щелочные ионы под действием теплового движения могут срывать с мест закрепления и перемещаться из одной ячейки пространственной сетки в другую. При этом усиливается ионно-релаксационная поляризация, что сопровождается увеличением диэлектрической проницаемости (рис. 1,б) и тангенса угла диэлектрических потерь. Одновременно наблюдается уменьшение удельного сопротивления материала (рис. 1,в), так как возрастает количество ионов, участвующих в процессе электропроводности.

Изменение электрических свойств стекла зависит от радиуса щелочного иона. Чем меньше радиус ионов, тем больше их подвижность, тем больший вклад вносят они в удельную проводимость материала. Поскольку ион натрия имеет меньший размер, чем ион калия, отрицательное влияние Na_2O на электрические свойства стекла сказывается сильнее, чем влияние K_2O . Экспериментально уста-

новлено, что при одновременном присутствии двух различных щелочных окислов в составе стекла его электрические свойства могут быть значительно лучше, чем при наличии только одного щелочного окисла. Это явление называют нейтрализационным или полищелочным эффектом.

Стёкла, содержащие в больших количествах окислы тяжёлых металлов (бария, титана, свинца) характеризуются малыми потерями даже при значительной добавке щелочных окислов. Атомы многовалентного металла, встраиваясь в структурную сетку стекла, не образуют тупиковых ветвей. Поэтому увеличение их концентрации не приводит к возрастанию релаксационных потерь. Более того, становясь на месте существующих обрывов ветвей, такие ионы могут соединить оборванные концы и укрепить пространственную сетку. Диэлектрическая проницаемость всех стёкол увеличивается с повышением температуры. Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости различных технических стёкол находится в пределах $(30 \div 500) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Кратковременная электрическая прочность стёкол при электрическом пробое мало зависит от их состава, решающим оказывается влияние воздушных включений — пузырей в толще стекла. В однородном электрическом поле электрическая прочность стекла очень велика и в некоторых случаях может достигать 500 МВ/м. В неоднородном поле пробой стекла в связи с краевым эффектом происходит при значительно более низких напряженностях. При высоких частотах (а при высоких температурах также и при низких частотах и даже при постоянном напряжении) пробой стекла носит тепловой характер.

Классификация стёкол по техническому назначению

Электровакuumные стёкла. Определяющим параметром стёкол для изготовления из них баллонов, ножек и других деталей электровакuumных приборов является температурный коэффициент линейного расширения. Он имеет очень важное значение при пайке и сварке различных стёкол, при впайке металлической проволоки или ленты в стекло. Значения α_1 , стекла и соединяемых с ним материалов должны быть приблизительно одинаковыми, так как иначе при изменении температуры может произойти растрескивание стекла, а также нарушение герметичности в месте ввода металлической проволоки в стекло. Кроме того, для высокочастотных приборов используют стёкла с низкими диэлектрическими потерями. Электровакuumные стёкла подразделяют и маркируют по численным значениям температурного коэффициента линейного расширения. Так как стёкла — это материалы с маленьким значением температурного коэффициента линейного расширения, а у металлов наблюдается закономерная связь температуры плавления со значением температурного коэффициента линейного расширения, то в стёкла удаётся впаивать только тугоплавкие металлы или металлические сплавы, у которых α_1 такой же, как у тугоплавких металлов.

Поэтому электровакуумные стёкла подразделяют на:

— платиновые (платинитовые)	$\alpha_1 = (85 \div 92) \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$
— молибденовые	$\alpha_1 = (46 \div 52) \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$
— вольфрамовые	$\alpha_1 = (35 \div 42) \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$

По химическому составу электровакуумные стёкла относятся к группе боросиликатных ($\text{B}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$) или алюмосиликатных ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$) материалов с добавками щелочных окислов. Названия «платиновое», «молибденовое», «вольфрамовое» определяются не составом стекла, а только тем, что значения α_1 , этих стёкол близки к α_1 платины, молибдена, вольфрама. Температурный коэффициент линейного расширения возрастает при увеличении содержания щелочных окислов. В обозначении марки электровакуумного стекла после буквы С указывают значение α_1 и серию разработки. Например, марка С89-5 характеризует стекло с $\alpha_1 = 89 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ серии 5.

Изоляторные стёкла. Стёкла легко металлизуются и используются в качестве герметизированных вводов в металлические корпуса различных приборов (конденсаторов, диодов, транзисторов и др.). Другим элементом изоляции, часто встречающимся в дискретных полупроводниковых приборах, является стеклянная буса, изолирующая металлические выводы прибора от фланца корпуса, на котором располагается полупроводниковый кристалл с *p-n*-переходами. Стеклянные бусы изготавливают из капилляров, нарезанных в виде трубок и колец определенных размеров. Обычно в качестве материала таких проходных изоляторов используют щелочное силикатное стекло.

Цветные стёкла. Обычные силикатные стёкла прозрачны для излучения в видимой части спектра. Некоторые добавки придают стёклам соответствующую окраску: CaO — синюю, Cr_2O_3 — зелёную, MnO_2 — фиолетовую и коричневую, UO_3 — жёлтую и т.д., что используется при изготовлении цветных стёкол, светофильтров, эмалей и глазурей.

Лазерные стёкла. Стекло может быть использовано в качестве рабочего тела в твердотельных лазерах. Генерирующими центрами являются активные ионы, равномерно распределённые в диэлектрической прозрачной матрице. Как правило, в стёклах отсутствуют ограничения в растворимости активирующих добавок. В практике наиболее часто применяют баритовый крон ($\text{BaO} - \text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$), активированный ионами неодима Nd^{3+} .

Основные преимущества стёкол, используемых в лазерах, перед монокристаллами заключаются в их высокой технологичности, оптической однородности, изотропности свойств. Из стекла сравнительно легко изготовить однородные стержни большого размера, что необходимо для достижения высокой выходной мощности лазерного излучения. Однако отсутствие дальнего порядка вызывает уширение линий люминесценции активированного стекла. Следствием этого является снижение степени монохроматичности выходного излучения

и увеличение пороговой мощности оптической накачки. К тому же стёкла по сравнению с монокристаллами обладают невысокой теплопроводностью, что создает дополнительные трудности для осуществления непрерывного режима генерации. Поэтому лазеры на стекле лучше подходят для генерации импульсов с высокой энергией излучения.

Стекловолокно. Большая гибкость и прочность стекловолокна объясняются ориентацией частиц поверхностного слоя стекла, при его быстром охлаждении. Весьма тонкие стеклянные волокна (диаметром $4\div 7$ мкм) имеют настолько высокую гибкость, что могут обрабатываться способами текстильной технологии. Из стеклянных нитей, скрученных из отдельных волокон, ткнут стеклянные ткани, ленты и шланги. Преимуществами стеклянной волокнистой изоляции перед изоляцией из органических волокон являются высокая нагревостойкость, значительная механическая прочность, относительно малая гигроскопичность и хорошие электроизоляционные свойства. Для производства стекловолокна используют щелочные алюмосиликатные, бесщелочные и малощелочные алюмоборосиликатные стёкла.

Световоды. Тонкие стеклянные волокна используют для передачи света между источником и приёмником излучения. Отдельные волокна могут быть соединены в световые кабели (жгуты) с внутренними межволоконными светоизолирующими покрытиями. Совокупность методов и средств передачи световой информации с помощью тончайших волокон получила название волоконной оптики, которая является важной составной частью оптоэлектроники.

Волоконные устройства отличаются компактностью и надёжностью. С их помощью можно осуществить поэлементную передачу изображения с достаточно высокой разрешающей способностью, причём передача изображения возможна по искривленному пути. Существенным моментом является скрытность передачи информации, высокая помехозащищённость оптического канала связи, в котором сами волокна играют роль световодов, т.е. служат направляющими системами — канализируют свет от источника к приёмнику информации. Направляющее действие волокон достигается за счёт эффекта многократного полного внутреннего отражения

Для передачи изображения используют волокна диаметром $5\div 15$ мкм. Чтобы предотвратить просачивание света из одного волокна в другое, их снабжают светоизолирующей оболочкой, которую изготавливают из стекла с меньшим показателем преломления, нежели у сердцевины. Световой кабель диаметром $5\div 6$ мм содержит несколько сотен тысяч светоизолированных волокон.

С помощью волоконных жгутов легко осуществить преобразование оптического изображения, его кодирование и дешифровку. Световые кабели из волокон с коническим сечением могут усиливать освещённость объектов за счёт концентрации светового потока, уменьшать или увеличивать изображение.

Специальные технологические приемы (осаждение плёнок на подложку, ионное легирование, ионный обмен) позволяют изготовить плоские световоды, которые являются основой оптических интегральных схем.

Увиолевые стёкла. В обыкновенном стекле прохождению ультрафиолетовых лучей препятствуют содержащиеся в нём окислы железа, особенно Fe_2O_3 . Этот недостаток стекла устраняют применением при выплавке чистых исходных материалов. Таким путём получают увиолевое стекло, которое почти так же хорошо пропускает ультрафиолетовые лучи, как и кварцевое, но гораздо дешевле его и легче обрабатывается. Содержание в этом стекле окислов железа не превышает $0.02 \div 0.08\%$. Увиолевое стекло применяется в медицине при облучении ультрафиолетовыми лучами и в некоторых случаях для изготовления оконного стекла.

Ситаллы. Состав. Свойства, получение, применение

Ситаллы («ситалл» — сокращение от слов «силикат»* и «кристалл») — продукт частичной кристаллизации стекломассы, в которую кроме обычных оксидов вводят тонкодисперсные примеси, служащие для образования центров кристаллизации. В различные марки ситаллов входят окислы: кремния — от 30 до 90%, титана — от 10 до 10%, бора — от 15 до 30%, алюминия — от 12 до 28%, магния — от 5 до 20%, калия — от 2 до 4%, лития — от 5 до 10%.

В качестве стимуляторов кристаллизации применяют оксид титана TiO_2 , серное железо FeS , фториды и фосфаты некоторых металлов и другие вещества. От стёкол ситаллы отличаются несколько иным химическим составом и строением и занимают промежуточное место между обычными стёклами и керамикой. Они состоят из равномерно распределённых по всему объёму мелких кристалликов, сросшихся друг с другом или соединённых тонкими прослойками остаточного стекла. Содержание кристаллической фазы в ситаллах достигает 95%, а размеры оптимально развитых кристалликов $0.01 \div 2$ мкм. В отличие от стёкол, ситаллы непрозрачны, но некоторые из них частично пропускают свет.

Технология изготовления ситаллов состоит в получении изделий из стекломассы специально подобранного состава традиционными способами и их последующей двухступенчатой термообработки. При температуре $500 \div 700^\circ\text{C}$ происходит образование центров кристаллизации, а при температуре $900 \div 1100^\circ\text{C}$ — развитие кристаллической фазы.

В процессе термообработки происходит усадка материала, достигающая 2%. Полученные таким способом ситаллы называют термоситаллами.

Формирование кристаллического строения в ситаллах может производиться фотохимическим способом. Под влиянием облучения и последующей низкотемпературной обработки (процесса проявления) из оксидов, входящих в состав стекла, выделяются мельчайшие (коллоидные) частицы металлов (меди, золота,

серебра, алюминия и др.), которые являются стимуляторами кристаллизации. В процессе проявления ранее бесцветный материал приобретает определённую окраску (от белого до коричневого цвета), такие ситаллы получили название фотоситаллов.

Разработаны сегнето- и пьезоситаллы, которые используют в качестве активных диэлектриков.

В зависимости от химического состава исходного стекла и режима термообработки получают ситаллы, обладающие высокой механической прочностью, твёрдостью, термической и химической стойкостью, с интервалом рабочих температур $-50 \div +700^\circ\text{C}$, более высокими электроизоляционными свойствами по сравнению со стёклами того же химического состава, невысокой стоимостью изделий благодаря доступности сырья и простоты технологии изготовления, малыми диэлектрическими потерями. Эти свойства ситаллов позволяют применять их для различных приборов электронной техники, работающих в широком диапазоне частот и температур.

Основные характеристики ситаллов

Плотность ρ , кг/м ³	2300÷3000
Температура размягчения, °С	900÷1300
Предел прочности, МПа: при изгибе при сжатии	120÷200 500÷1200
Температурный коэффициент линейного расширения α , К ⁻¹	$(0.1 \div 12) \cdot 10^{-6}$
Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	$10^{10} \div 10^{12}$
Диэлектрическая проницаемость	5÷7
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 1 МГц	$(10 \div 800) \cdot 10^{-4}$
Электрическая прочность $E_{пр}$, МВ/м	20÷80

Волновая теория света и законы геометрической оптики

В конце XVII века на основе многовекового опыта и развития представлений о свете Ньютон выдвинул теорию истечения световых частиц (корпускул), которые летят прямолинейно и подчиняются законам механики. По этой теории отражение света уподоблялось отражению упругих шариков при ударе о плоскость, что приводило к известному из школьного курса закону геометрической оптики: «угол падения равен углу отражения». Закон преломления света на границе двух сред объяснялся притяжением световых частиц преломляющей средой, вследствие чего изменялась траектория их движения и скорость. Расчеты приводили к выводу, что скорость световых частиц в более плотных средах больше, чем в воздухе. Однако этот вывод Ньютона в дальнейшем был экспериментально опровергнут. Теория корпускул продержалась долгое время, в основном, за счёт непререкаемого авторитета Ньютона. Современник Ньютона Х. Гюйгенс предложил другую теорию света — волновую. Впоследствии волновая теория получила своё обоснование, как в экспериментах, так и в рамках теоретических представлений об электромагнитной природе света — уравнениях Максвелла и следующих из них свойствах электромагнитных волн. Она позволила объяснить и изучить такие оптические явления, как дифракция, интерференция и поляризация. При этом волновая теория хорошо объясняет известные законы геометрической оптики.

Принцип Гюйгенса

Для анализа распространения света Гюйгенс предложил простой и наглядный метод, названный впоследствии **принципом Гюйгенса**:

Каждая точка среды, до которой доходит световое возбуждение, является в свою очередь центром вторичных волн. Поверхность, огибающая в некоторый момент времени эти вторичные волны, указывает положение фронта действительно распространяющейся волны в этот момент времени.

Волновым фронтом называется *геометрическое место точек, колеблющихся в одной и той же фазе.*

Пусть в момент t фронт волны занимает положение S_1 (рис. 2). Каждую точку этого фронта можно рассматривать как источник вторичных волн, которые в однородной изотропной среде будут представлять собой сферы радиусом $v\Delta t$. Таким образом, в момент времени $t + \Delta t$ фронтом S_2 волны будет огибающая этих вторичных волн.

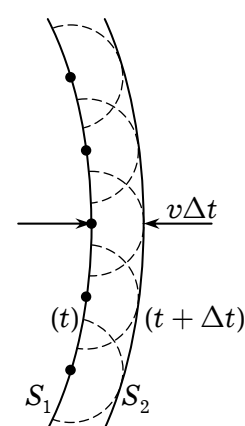


Рис. 2

Законы отражения и преломления света

Корпускулярная теория очень просто объясняла явления геометрической оптики, описываемые в терминах распространения световых лучей. С точки зрения волновой теории, лучи — это нормали к фронту волны. Принцип Гюйгенса также позволяет объяснить законы геометрической оптики на основе волновых представлений о природе света.

Закон отражения. Когда световые волны достигают границы раздела двух сред, направление их распространения изменяется. Если они остаются в той же среде, то происходит *отражение света*. Закон отражения света хорошо известен:

Падающий луч, перпендикуляр к границе раздела двух сред в точке падения и отраженный луч лежат в одной плоскости, причём угол падения равен углу отражения.

Допустим, что плоская волна, распространяющаяся в изотропной среде, падает на границу раздела двух сред AC (рис. 3). Достаточно рассмотреть два параллельных луча I в падающем пучке. Углом падения называют угол $\alpha_{\text{пад}}$ между нормалью \vec{n} и падающим лучом I . Плоский фронт AB падающей волны впервые достигнет границы раздела в точке A , которая станет источником вторичных волн.

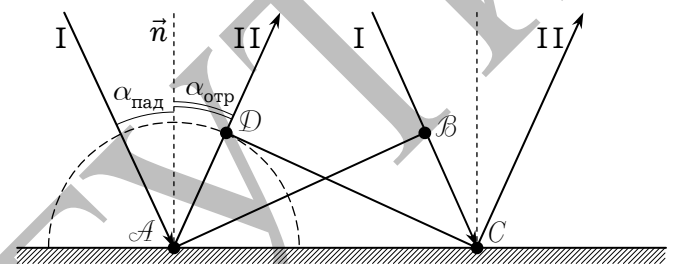


Рис. 3

Согласно принципу Гюйгенса, из неё, как из центра, будет распространяться сферическая волна. Через время $\Delta t = BC/v$ луч BC из падающего пучка I придёт в точку C . К этому моменту вторичная сферическая волна, распространяющаяся из точки A , будет иметь радиус $v\Delta t = BC$ (т.е. $AD = BC$). Мы знаем теперь положение двух точек фронта отраженной волны — C и D . Чтобы не загромождать рисунок, на нём не показаны вторичные волны, испущенные точками, лежащими между A и C , но линия CD будет касательной (огibaющей) ко всем из них. Стало быть, CD действительно является фронтом отраженной волны. Направление её распространения (лучи II) ортогонально фронту CD . Из равенства треугольников ABC и ADC вытекает равенство углов: $\angle DAC = \angle BCA$, что, в свою очередь, приводит к закону отражения

$$\alpha_{\text{пад}} = \alpha_{\text{отр}}.$$

Закон преломления. Если световые волны достигают границы раздела двух сред и проникают в другую среду, то направление их распространения также изменяется — происходит *преломление света*. Закон преломления:

Падающий луч, перпендикуляр к границе раздела сред в точке падения, и преломленный луч лежат в одной плоскости, причём отношение синуса угла

падения к синусу угла преломления постоянно для данной пары сред и равно показателю преломления второй среды относительно первой:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Рассмотрим плоскую волну (фронт AB), которая распространяется в среде с показателем преломления n_1 вдоль направления I со скоростью $v_1 = c/n_1$. Эта волна падает на границу раздела со средой, в которой показатель преломления равен n_2 , а скорость распространения — $v_2 = c/n_2$ (рис. 4).

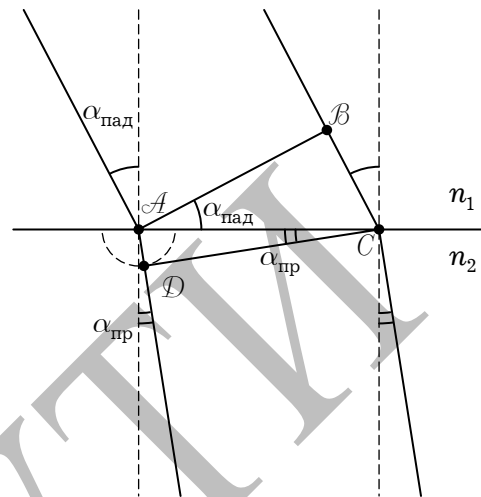


Рис. 4

Время, затрачиваемое падающей волной для прохождения пути BC , равно $\Delta t = BC/v_1$. За это же время фронт волны, возбуждаемой точкой A во второй среде, достигнет точек полушеры с радиусом $AD = v_2 \Delta t$. В соответствии с принципом Гюйгенса, положение фронта преломлённой волны в этот момент времени задается плоскостью DC , а направление её распространения — лучом III, перпендикулярным к DC . Из треугольников ABC и ADC следует

$$AC = \frac{BC}{\sin \alpha_{\text{пад}}} = \frac{AD}{\sin \alpha_{\text{пр}}}.$$

Из последнего равенства

$$\frac{\Delta t \cdot v_1}{\sin \alpha_{\text{пад}}} = \frac{\Delta t \cdot v_2}{\sin \alpha_{\text{пр}}}.$$

Таким образом, закон преломления света записывается так:

$$\frac{\sin \alpha_{\text{пад}}}{\sin \alpha_{\text{пр}}} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c}{n_1} \frac{n_2}{c} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}.$$

Современные представления о световой волне

В волновой оптике рассматриваются волновые явления, в которых проявляется волновая природа света. Теперь известно, что свет представляет собой электромагнитную волну. Как известно, электромагнитная волна, это особое состояние электромагнитного поля, когда оно «отрывается» от «источника» и распространяется в пространстве. При этом, электромагнитное поле, в любой момент времени t , определяется заданием в каждой точке пространства с радиус-вектором \vec{r} двух векторов: напряжённости электрического поля $\vec{E}(\vec{r}, t)$ и индукции магнитного поля $\vec{B}(\vec{r}, t)$ (или напряжённости магнитного поля $\vec{H}(\vec{r}, t)$).

Наибольшей простотой отличаются плоские монохроматические волны — волны строго определенной частоты с волновым фронтом в виде плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.

Существование электромагнитных волн вытекает из уравнений Максвелла. В случае однородной нейтральной ($\rho = 0$) непроводящей ($\vec{j} = 0$) среды с постоянными проницаемостями ε и μ уравнения Максвелла будут выглядеть следующим образом:

$$[\nabla, \vec{E}] = -\mu\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\nabla \vec{H} = 0, \quad (2)$$

$$[\nabla, \vec{H}] = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\nabla \vec{E} = 0. \quad (4)$$

Возьмём ротор от обеих частей уравнения (1):

$$[\nabla, [\nabla, \vec{E}]] = -\mu\mu_0 \left[\nabla, \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right]. \quad (5)$$

Символ ∇ (читается «набла») означает формальный вектор (символический дифференциальный оператор Гамильтона), состоящий из операторов дифференцирования по координатам:

$$\nabla = \vec{e}_x \frac{\partial}{\partial x} + \vec{e}_y \frac{\partial}{\partial y} + \vec{e}_z \frac{\partial}{\partial z},$$

где $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ — орты осей Ox, Oy, Oz . Соответственно, векторное и скалярное произведения оператора «набла» на векторное поле являются ротором и дивергенцией этого векторного поля, а произведение ∇ на скалярное поле — градиентом скалярного поля:

$$[\nabla, \vec{E}] = \text{rot } \vec{E}, \quad \nabla \vec{E} = \text{div } \vec{E}, \quad \nabla \varphi = \text{grad } \varphi.$$

Изменение последовательности дифференцирования по координатам и времени с учётом (3) приводит к равенству

$$[\nabla, [\nabla, \vec{E}]] = -\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}. \quad (6)$$

Используя известное свойство векторного анализа

$$[\nabla, [\nabla, \vec{E}]] = \nabla \cdot (\nabla \vec{E}) - \Delta \vec{E},$$

где Δ («дельта прописная») — оператор Лапласа:

$$\Delta = \nabla^2 \equiv (\nabla, \nabla) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

В силу (4) первый член правой части этого выражения равен нулю. Поэтому левая часть формулы (6) равна $-\Delta\vec{E}$. Таким образом, опустив слева и справа знак минус, приходим к уравнению

$$\Delta\vec{E} = \varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0 \frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2},$$

которое совпадает по виду с волновым уравнением. Учитывая, что перед второй производной по времени, должна стоять величина, обратная квадрату фазовой скорости волны, получим:

$$v_{\text{ф}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}}.$$

В вакууме $\varepsilon = \mu = 1$, тогда скорость электромагнитных волн в вакууме:

$$c = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}.$$

Полученное значение скорости c с большой степенью точности совпадает со скоростью света в вакууме. Данный факт позволяет говорить об электромагнитной природе света.

С учётом последнего равенства, фазовая скорость света в однородной изотропной среде:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}.$$

Отношение скорости света в вакууме c к фазовой скорости в среде v называется *абсолютным показателем преломления* этой среды n . Сравнение предыдущей формулы с определением показателя преломления даёт

$$n = \sqrt{\varepsilon\mu}.$$

Для подавляющего большинства оптически прозрачных сред $\mu \approx 1$, поэтому можно считать

$$n = \sqrt{\varepsilon}.$$

Окончательно, волновое уравнение для вектора напряжённости электрического поля запишется в виде

$$\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\vec{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\vec{E}}{\partial z^2} = \frac{\varepsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2}. \quad (7)$$

Взяв ротор от обеих частей уравнения (3) и произведя аналогичные преобразования, придём к уравнению

$$\frac{\partial^2\vec{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\vec{H}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\vec{H}}{\partial z^2} = \frac{\varepsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2\vec{H}}{\partial t^2}. \quad (8)$$

Уравнения (7) и (8) неразрывно связаны друг с другом, так как они получены из уравнений (1) и (3), которые содержат \vec{E} и \vec{H} .

Плоская электромагнитная волна

Рассмотрим плоскую электромагнитную волну, распространяющуюся в нейтральной непроводящей среде с постоянными проницаемостями ε и μ ($\rho = 0$, $\vec{j} = 0$, $\varepsilon = \text{const}$, $\mu = \text{const}$). Направим ось x перпендикулярно к волновым поверхностям. Тогда \vec{E} и \vec{H} , а значит, и их компоненты по координатным осям не будут зависеть от координат y и z . Поэтому уравнения (1)-(4) упрощаются следующим образом:

$$0 = \mu\mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t}, \quad \frac{\partial E_z}{\partial x} = \mu\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t}, \quad \frac{\partial E_y}{\partial x} = -\mu\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t}, \quad (9)$$

$$\partial H_x / \partial x = 0, \quad (10)$$

$$0 = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t}, \quad \frac{\partial H_z}{\partial x} = -\varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t}, \quad \frac{\partial H_y}{\partial x} = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial E_z}{\partial t}, \quad (11)$$

$$\partial E_x / \partial x = 0. \quad (12)$$

Уравнение (12) и первое из уравнений (11) показывают, что E_x не может зависеть ни от x , ни от t . Уравнение (10) и первое из уравнений (9) дают такой же результат для H_x . Следовательно, отличные от нуля E_x и H_x могут быть обусловлены лишь постоянными однородными полями, накладываемыми на электромагнитное поле волны. Само поле волны не имеет составляющих вдоль оси x . Отсюда вытекает, что векторы \vec{E} и \vec{H} перпендикулярны к направлению распространения волны, т.е. что электромагнитные волны поперечны. Будем предполагать постоянные поля отсутствующими и полагать $E_x = H_x = 0$.

Два последних уравнения (9) и два последних уравнения (11) можно объединить в две независимые группы:

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\mu\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t}, \quad \frac{\partial H_z}{\partial x} = -\varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial x} = \mu\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t}, \quad \frac{\partial H_y}{\partial x} = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial E_z}{\partial t}. \quad (14)$$

Первая группа уравнений связывает компоненты E_y и H_z , вторая — компоненты E_z и H_y .

Решая систему уравнений (13), положив $E_z = H_y = 0$, получим волновые уравнения для E_y и для H_z :

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \frac{\varepsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} = \frac{\varepsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial t^2}. \quad (16)$$

Простейшими решениями уравнений (15), (16) являются

$$E_y = E_m \cos(\omega t - kx + \alpha_1); \quad (17)$$

$$H_z = H_m \cos(\omega t - kx + \alpha_2). \quad (18)$$

В этих формулах ω — частота волны; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число; α_1 и α_2 — начальные фазы колебаний в точках с координатой $x = 0$.

Подставим функции (17) и (18) в уравнения (14):

$$kE_m \sin(\omega t - kx + \alpha_1) = \mu\mu_0\omega H_m \sin(\omega t - kx + \alpha_2);$$

$$kH_m \sin(\omega t - kx + \alpha_2) = \varepsilon\varepsilon_0\omega E_m \sin(\omega t - kx + \alpha_1).$$

Для того чтобы уравнения удовлетворялись, необходимо равенство начальных фаз $\alpha_1 = \alpha_2$ и выполнение соотношений:

$$kE_m = \mu\mu_0\omega H_m; \quad kH_m = \varepsilon\varepsilon_0\omega E_m.$$

Перемножив эти два равенства, найдём, что

$$\varepsilon\varepsilon_0 E_m^2 = \mu\mu_0 H_m^2.$$

Таким образом, колебания электрического и магнитного векторов в электромагнитной волне происходят с одинаковой фазой, а амплитуды этих векторов связаны соотношением

$$\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0} E_m = \sqrt{\mu\mu_0} H_m. \quad (19)$$

Для волны, распространяющейся в вакууме,

$$\frac{E_m}{H_m} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \approx \sqrt{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} = 120\pi \approx 377 [\text{Ом}].$$