

Песок давно минувших дней шлёт в будущее голоса людей^{1,2}

Ч.К. Као

(Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2009 г.)

PACS numbers: 01.30.Bb, 42.79.Gn, 42.81.-i

DOI: 10.3367/UFNr.0180.201012i.1350

Содержание

1. Введение (1350).
 2. Юность (1350).
 3. Ключевое открытие (1351).
 4. Статья (1352).
 5. Убеждая мир (1354).
 6. Влияние на мир (1355).
 7. Заключение (1355).
- Список литературы (1356).

1. Введение

Прежде всего я хочу выразить благодарность Шведской Королевской академии наук и её Нобелевскому комитету по физике за присуждение мне Нобелевской премии по физике за 2009 год. Не так часто эта премия присуждается за прикладные научные исследования. Практический характер той работы, а также прошедшее с тех пор время означают, что за эти годы усилиями большого числа людей в данной области много сделано, а достигнутый коллективными усилиями результат оказал на общество большое влияние. Поэтому лекция посвящена как исследованиям, которые привели к важнейшим открытиям, так и некоторым последовавшим за ними событиям.

Мир телефонии сильно изменился за 43 года, прошедших после опубликования в 1966 г. моей работы с Хокэмом по стеклянным волоконно-оптическим кабелям [1]. Скептицизм первых лет постепенно исчез под влиянием неизменного революционного прогресса в волоконной оптике. В 1970-х годах, когда я занимался подготовкой производства оптоволокна в ИТТ, Международной телефонной и телеграфной корпорации в г. Роанок, Вирджиния, США, я получил два письма. Одно из них содержало угрозы и обвиняло меня в том, что я выпускаю на волю злого джина из бутылки. Другое же, от китайского фермера, просило меня дать ему возможность передать просьбу его жене принести ему обед. Авторы обоих писем заглядывали в будущее, которое стало уже историей.

Ч.К. Као (Ch.K. Kao). The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China

2. Юность³

Проработав некоторое время в качестве инженера-стажёра в компании STC (Standard Telephones and Cables) в Вулддже, я в 1960 г. пришёл в Standard Telecommunications Laboratories Ltd. (STL), дочернюю компанию корпорации ИТТ в Соединённом королевстве. В STL прилагали значительные усилия для улучшения возможностей существовавшей инфраструктуры связи, делая акцент на использовании передающих систем миллиметрового диапазона.

Миллиметровые волны в диапазоне частот от 35 до 70 ГГц могли обеспечить значительно более высокую пропускную способность. Но это было плаванием в неизведанных морях, а трудности были огромными, поскольку радиоволны на таких частотах нельзя было передавать на большие расстояния из-за расходимости пучка и поглощения в атмосфере. Эти волны следовало направлять по волноводу. И в 1950-х годах началась разработка цилиндрических волноводов на моде HE₁₁ с низкими потерями. Испытательная система была развёрнута в 1960-х годах. Были сделаны огромные инвестиции, и предполагалось вложить ещё большие суммы, чтобы подготовить производство этих систем. В обществе возникли ожидания новых телекоммуникационных систем, таких как видеотелефон.

Я стал членом группы в STL, руководимой доктором Карбовяком. Группа работала над волноводом для дальней связи. Мне не терпелось увидеть цилиндрический волновод в реальности [4] (рис. 1)⁴. Я должен был искать новые методы передачи СВЧ- и оптического излучения. Для лучшего понимания проблем волноводов — новой для того времени идеи — привлекались

¹ Эту лекцию для Чарльза Као подготовила Гвен Као при содействии Лиан Куан Чен, Квок Вай Ченг, Мелоди Ли, Винг Шинг Вонг и Кеннет Янг. Лекция была прочитана Гвен Као от имени Чарльза Као.
² Оригинал названия: Sand from centuries past: send future voices fast. Оно принадлежит к поэтическому ряду и непереводаемо. Дословный перевод (песок из прошлых столетий: шлёт будущему голоса быстро) не передаёт ни ритмики (sand-send, past-fast), ни образного смысла. Песок для Ч. Као — символ его Нобелевского изобретения: ведь песок является основой кварцевого оптического волокна. (Примеч. научного ред.)

³ Текст цитируется дословно из [2, 3].

⁴ В электронной версии рисунки даны в цветном изображении (см. сайт УФН www.ufn.ru)

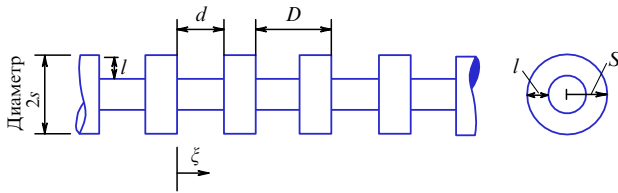


Рис. 1. Волновод круглого сечения (согласно [4]). © [1954] IEEE.

совместно геометрическая оптика и волновая теория. Позднее д-р Карбовяк побудил меня одновременно с работой в STL заняться диссертацией. Поэтому я зарегистрировался в Университетском колледже в Лондоне и за два года завершил работу над диссертацией "Квазиоптические волноводы".

Создание лазеров в 1960-х годах вселило в телекоммуникационное сообщество веру в то, что оно стоит на пороге создания оптических систем связи. Новым носителем информации должен был стать когерентный свет, который обеспечивает скорость передачи информации в 10^5 раз выше, чем у выделенной СВЧ-линии передачи данных, как следует из простого сравнения частот: 3×10^{15} Гц (3000 ТГц) у света против 3×10^9 Гц (3 ГГц) у СВЧ-излучения. (Известные нам современные волоконно-оптические системы дальней связи работают с лазерами на длинах волн 1,3–1,5 мкм, что соответствует оптической частоте $\sim 2 \times 10^{14}$ Гц. Приведённая Ч.К. Као частота 3×10^{15} Гц, на наш взгляд, несколько гиперболизирована; либо он мечтает о будущем — оптических волокнах, пропускающих вакуумный ультрафиолет с длиной волны $\sim 0,1$ мкм. — *Примеч. научного ред.*)

Началось состязание между цилиндрическими СВЧ-волноводами и оптической связью, причём значительный перевес был на стороне первых. В 1960 г. оптические лазеры были ещё на ранней стадии развития и демонстрировались лишь в небольшом числе лабораторий, а их параметры значительно уступали требуемым. Оптические системы представлялись неосуществимой идеей. Я же, тем не менее, полагал, что у лазеров был потенциал. Я сказал себе: "Разве можно с такой лёгкостью отвергать лазер? Оптическая связь слишком заманчива, чтобы оставлять её на полке теории". Я задал себе два простых вопроса:

1. Является ли рубиновый лазер подходящим источником для оптической связи?

2. Какой материал обладает достаточно высокой прозрачностью на таких длинах волн?

В то время лишь две группы в мире начинали задумываться над проблемой пропускания применительно к оптической связи, а несколько других групп работали над твердотельными и полупроводниковыми лазерами. Лазеры испускают когерентное излучение в оптическом диапазоне частот, однако использование этого излучения для связи представлялось затруднительным, если вообще возможным. Чтобы оптическая связь оправдала ожидания, предстояло решить много сложных задач.

3. Ключевое открытие⁵

В 1963 г. я уже был вовлечён в эксперименты по прохождению излучения через атмосферу: быстрый прогресс лазерной и полупроводниковой технологии позво-

лил перевести исследования в области оптической связи в практическую плоскость. Направляя пучок He–Ne лазера на точку, находящуюся на некотором расстоянии от него, группа из STL быстро обнаружила, что свет от удалённого лазера мерцал. Из-за флуктуаций в атмосфере пучок "плясал" в области размером в несколько диаметров пучка. Кроме того, группа пыталась повторить эксперименты, выполненные другими исследовательскими лабораториями в мире. Например, мы ставили эксперименты с конфокальными линзами, как и в Bell Laboratories: устанавливалась последовательность выпуклых линз, отстоящих друг от друга на фокусное расстояние. Но даже глубокой ночью, когда воздух спокоен, и при перефокусировке через каждые 100 м пучок отказывался оставаться в пределах апертуры линзы.

Эксперименты в Bell Laboratories с использованием газовых линз были прекращены из-за трудностей в обеспечении достаточно эффективной изоляции при поддержании профилей газовых линз. Эти эксперименты были жестом отчаяния в попытке управлять распространением света на большие расстояния.

В STL стали думать о создании диэлектрических волноводов. Диэлектрик означает непроводник электричества; диэлектрический волновод представляет собой диэлектрический цилиндр, окружённый воздухом. Д-р Карбовяк предложил мне и трём другим сотрудникам поработать над его идеей тонкоплёночного волновода [5, 6] (рис. 2). Но идея тонкоплёночного волновода не сработала: удержание оптической волны было недостаточно сильным и свет выходил наружу, преодолевая изгиб.

Когда д-р Карбовяк решил эмигрировать в Австралию, я стал руководителем проекта и предложил группе исследовать механизм потерь в диэлектрических материалах для оптических волокон. Небольшая группа работала над методами измерения потерь в прозрачных материалах с низкими потерями. Вместе со мной над характеристиками диэлектрических волноводов стал работать Джордж Хокэм. Теория волноводов представляла для него интерес, и он сосредоточился на требова-

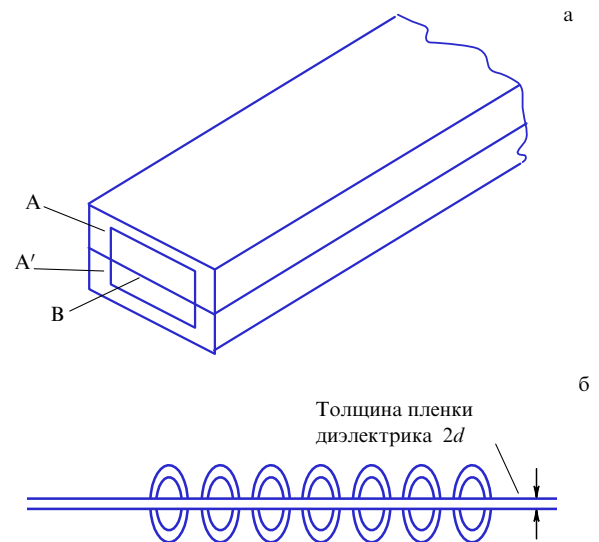


Рис. 2. Тонкоплёночный волновод (согласно [6]). © [1965] IEEE.

⁵ Текст также цитируется дословно из [2, 3].

ниях по допускам, предъявляемых к оптоволоконному волноводу, в частности по допустимым отклонениям размера, и на потерях в местах соединений. Мы приступили к систематическому изучению физических и волноводных требований к оптическим волокнам.

Кроме того, я побуждал своих коллег из лазерной группы работать над созданием полупроводникового лазера в ближней инфракрасной области с эмиссионными характеристиками, соответствующими диаметру одномодового волокна. Одномодовое волокно — это оптоволокно, рассчитанное на пропускание одного луча, или одной световой моды, в качестве носителя. Источником излучения должен был быть долговечный лазер, работающий при комнатной температуре без охлаждения жидким азотом. И так, было много препятствий. Но в начале 1960-х годов позволяли проводить эзотерические исследования при условии, что они не были слишком дорогими.

В течение последующих двух лет группа работала в этом направлении. Мы все были новичками в физике и химии материалов и решении новых задач в теории электромагнитных волн. Но мы делали продуманные шаги и уверенно двигались вперед. Мы изучали литературу, общались со специалистами и собирали образцы материалов от различных производителей стёкол и полимеров. Мы также работали над теорией и разрабатывали методы измерений, чтобы проводить множество экспериментов. Мы создали прибор для измерения спектральных потерь в материалах с очень низкими потерями, а также прибор для экспериментов по масштабированному моделированию с целью измерения потерь в волокне, обусловленных механическими дефектами.

Я сконцентрировался на стекле как на возможном прозрачном материале. Стекло изготавливается из кварца — *песка минувших столетий*, — имеющегося в изобилии дешёвого сырья. Оптические потери в прозрачных материалах обусловлены тремя механизмами: собственным поглощением, примесным поглощением и рэлеевским рассеянием. Собственное поглощение в инфракрасной области — это поглощение в структуре самого материала: оно определяет длинноволновую границу области прозрачности. Примесное поглощение обусловлено примесями ионами, остающимися в материале. Рэлеевское рассеяние фотонов происходит на структурных неоднородностях материала. Для большинства практических применений стекла (таких как окна) прозрачности стекла вполне достаточно, и никто до этого не изучал прозрачность стёкол вплоть до такого уровня. После обсуждений со многими людьми в конечном счёте я пришёл к следующим выводам.

1. Концентрация примесей, в особенности переходных элементов, таких как Fe, Cu и Mn, должна быть уменьшена до миллионных (ppm) или даже миллиардных (ppb) долей. Могут ли, однако, концентрации примесей быть уменьшены до столь низкого уровня?

2. Жаропрочные стёкла быстро затвердевают и должны иметь более тонкую микроструктуру и более равномерное распределение неоднородностей, нежели низкотемпературные стекла, такие как полимеры, и, следовательно, более низкие потери на рассеяние.

Наши эксперименты по СВЧ-моделированию также завершились. Характеристики диэлектрического волновода были полностью определены через его моды и допустимые отклонения размера как для рассогласова-

ния на стыке "торец к торцу", так и для флуктуаций диаметра по длине волокна. И теория, и моделирование подтверждали обоснованность нашего подхода.

Хокэм и я написали статью, озаглавленную "Диэлектрические волоконные поверхностные световоды для оптических частот" и направили её в *Труды Института электротехники* (Proc. IEE). Она появилась после обычного рецензирования и доработки в июле 1966 г. — это дата, которая теперь считается днём рождения волоконно-оптической связи.

4. Статья

Статья начиналась с краткого обсуждения свойств мод у волокна круглого поперечного сечения. Далее она сосредоточивалась на материальных аспектах, которые рассматривались как основной камень преткновения. В то время потери в наиболее прозрачном стекле составляли 200 дБ км^{-1} , что ограничивало бы пропускание несколькими метрами — это вполне очевидно для каждого, кто хоть однажды смотрел через толстый кусок стекла: ничего не видно. Но в нашей статье было указано, что собственные потери, обусловленные рассеянием, могут составлять всего лишь 1 дБ км^{-1} , что позволило бы осуществлять передачу на практически значимых расстояниях. "Виновниками" являются примеси — на данных длинах волн преимущественно двух- и трёхвалентные ионы железа. Цитата из статьи:

"Мы предвидим, что будут получены стёкла с объёмными потерями около 20 дБ км^{-1} на длинах волн около $0,6 \text{ мкм}$, поскольку концентрация примесных ионов может быть понижена до 1 части на миллион".

Говоря на языке дилетанта, если стекло достаточно "чистое", то можно будет видеть сквозь слой стекла толщиной в несколько сотен метров. Эта важнейшая догадка и открыла дорогу для оптической связи.

В статье также рассматривалось много других вопросов:

- Потери можно снизить, если мода выбрана таким образом, что большая часть энергии находится вне волокна.

- Волокно должно быть окружено оболочкой с более низким показателем преломления (позднее это стало стандартной технологией).

- Потери энергии, обусловленные изгибами волокна, пренебрежимо малы при радиусе изгиба более 1 мм .

- Оценены потери, обусловленные непостоянством сечения.

- Проанализированы свойства одномодового волокна (являющегося в настоящее время основным элементом для систем высокоскоростной передачи данных на большие расстояния). Объяснено, как дисперсия ограничивает ширину полосы пропускания; приведён расчётный пример для 10-километрового пути — весьма смелый сценарий для 1966 г. Статья заканчивалась следующим выводом [1]:

"Реализация удачного волоконного волновода в настоящий момент зависит от наличия подходящего диэлектрического материала с низкими потерями. Представляется, что эту ключевую проблему, связанную с материалом, трудно, но можно решить. Требуемые потери (около 20 дБ км^{-1}), безусловно, лежат намного ниже минимальных потерь, определяемых фундаментальными ограничениями".

Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies

K. C. Kao, B.Sc.(Eng.), Ph.D., A.M.I.E.E., and G. A. Hockham, B.Sc.(Eng.), Graduate I.E.E.

Synopsis

A dielectric fibre with a refractive index higher than its surrounding region is a form of dielectric waveguide which represents a possible medium for the guided transmission of energy at optical frequencies. The particular type of dielectric-fibre waveguide discussed is one with a circular cross-section. The choice of the mode of propagation for a fibre waveguide used for communication purposes is governed by consideration of loss characteristics and information capacity. Dielectric loss, bending loss and radiation loss are discussed, and mode stability, dispersion and power handling are examined with respect to information capacity. Physical-realisation aspects are also discussed. Experimental investigations at both optical and microwave wavelengths are included.

List of principal symbols

- J_n = n th-order Bessel function of the first kind
- K_n = n th-order modified Bessel function of the second kind
- $\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g}$, phase coefficient of the waveguide
- J'_n = first derivative of J_n
- K'_n = first derivative of K_n
- h_i = radial wavenumber or decay coefficient
- ϵ_i = relative permittivity
- k_0 = free-space propagation coefficient
- a = radius of the fibre
- γ = longitudinal propagation coefficient
- k = Boltzman's constant
- T = absolute temperature, deg K
- β_c = isothermal compressibility
- λ = wavelength
- n = refractive index
- $H_v^{(j)}$ = v th-order Hankel function of the i th type
- H'_v = derivation of H_v
- ν = azimuthal propagation coefficient = $\nu_1 - j\nu_2$
- L = modulation period

Subscript n is an integer and subscript m refers to the m th root of $J_n = 0$

1 Introduction

A dielectric fibre with a refractive index higher than its surrounding region is a form of dielectric waveguide which represents a possible medium for the guided transmission of energy at optical frequencies. This form of structure guides the electromagnetic waves along the definable boundary between the regions of different refractive indexes. The associated electromagnetic field is carried partially inside the fibre and partially outside it. The external field is evanescent in the direction normal to the direction of propagation, and it decays approximately exponentially to zero at infinity. Such structures are often referred to as open waveguides, and the propagation is known as the surface-wave mode. The particular type of dielectric-fibre waveguide to be discussed is one with a circular cross-section.

2 Dielectric-fibre waveguide

The dielectric fibre with a circular cross-section can support a family of H_{0m} and E_{0m} modes and a family of hybrid HE_{nm} modes. Solving the Maxwell equations under the

boundary conditions imposed by the physical structure, the characteristic equations are as follows:

for HE_{nm} modes

$$\frac{n^2 \beta^2}{k_0} \left(\frac{1}{u_1^2} + \frac{1}{u_2^2} \right)^2 = \left\{ \frac{\epsilon_1 J'_n(u_1)}{u_1 J_n(u_1)} + \frac{\epsilon_2 K'_n(u_2)}{u_2 K_n(u_2)} \right\} \times \left\{ \frac{1 J'_n(u_1)}{u_1 J_n(u_1)} + \frac{1 K'_n(u_2)}{u_2 K_n(u_2)} \right\} \quad (1)$$

for E_{0m} modes

$$\frac{\epsilon_1 J'_0(u_1)}{u_1 J_0(u_1)} = - \frac{\epsilon_2 K'_0(u_2)}{u_2 K_0(u_2)} \quad \dots \quad (2)$$

for H_{0m} modes

$$\frac{1 J'_0(u_1)}{u_1 J_0(u_1)} = - \frac{1 K'_0(u_2)}{u_2 K_0(u_2)} \quad \dots \quad (3)$$

The auxiliary equations defining the relationship between u_1 and u_2 are

$$\begin{aligned} u_1^2 + u_2^2 &= (k_0 a)^2 (\epsilon_1 - \epsilon_2) \\ h_1^2 &= \gamma^2 + k_0^2 \epsilon_1 \\ -h_2^2 &= \gamma^2 + k_0^2 \epsilon_2 \\ u_i &= h_i a, \quad i = 1 \text{ and } 2 \end{aligned}$$

where subscripts 1 and 2 refer to the fibre and the outer region, respectively.

All the modes exhibit cutoffs except the HE_{11} mode, which is the lowest-order hybrid mode. It can assume two orthogonal polarisations, and it propagates with an increasing percentage of energy outside the fibre as the dimensions of the structure decrease. Thus, when operating the waveguide in the HE_{11} mode, it is possible to achieve a single-mode operation by reducing the diameter of the fibre sufficiently. Under this condition, a significant proportion of the energy is carried outside the fibre. If the outside medium is of a lower loss than the inside dielectric medium, the attenuation of the waveguide is reduced. With these properties, HE_{11} mode operation is of particular interest.

The physical and electromagnetic aspects of the dielectric-fibre waveguide carrying the HE_{11} mode for use at optical frequencies will now be studied in detail. Conclusions are drawn as to the feasibility and the expected performance of such a waveguide for long-distance-communication application.

Paper 5033 E, first received 24th November 1965 and in revised form 15th February 1966
Dr. Kao and Mr. Hockham are with Standard Telecommunication Laboratories Ltd., Harlow, Essex, England
PROC. IEE, Vol. 113, No. 7, JULY 1966

Рис. 3. Статья 1966 года. © [1966] IEEE.

По существу, все предсказания точно указывали путь развития: в настоящее время потери составляют 10^{-2} от предсказанных, а ширина полосы пропускания в 10^5 раз превосходит предсказанную ширину полосы — 8 УФН, т. 180, № 12

оценка прошедших событий показывает, что революционное предложение в статье 1966 г. оказалось чересчур осторожным.

5. Убеждая мир

Содержание статьи было доложено на конференции Института электротехники 27 января 1966 г. [7]. Почти никто в мире не обратил на это внимания — кроме Британского почтового ведомства (БПВ) и Министерства обороны Объединённого Королевства, которые сразу же развернули крупные программы исследований [8, 9]. К концу 1966 г. три группы в Объединённом Королевстве изучали различные аспекты проблемы: я в STL; Робертс в БПВ; Гемблинг в Саутгемптоне в сотрудничестве с Вильямсом из лаборатории Министерства обороны [10].

В течение нескольких следующих лет я путешествовал по миру, проталкивая свою идею: в Японию, где с той поры у меня сложились прочные дружеские связи; в исследовательские лаборатории в Германии, в Нидерландах и в других местах, с тем чтобы сообщить новости. Для меня было очевидно, что использование стеклянных волокон не состоится до тех пор, пока новая тематика не станет модной и всё новые и новые исследователи начнут за неё браться. Преобладал скептицизм, но я оставался непоколебим. Мировая телефонная индустрия слишком велика, чтобы её мог изменить один человек или даже одна страна, но я был упрям и оставался оптимистом; постепенно другие превратились в приверженцев.

Специалисты вначале заявляли, что материалы были самой сложной из непреодолимых внутренних проблем. Гемблинг [8, 9] написал, что British Telecom ранее довольно негативно относился к предложению, а Bell Laboratories, которые могли бы стать лидером в этой области, обратили на неё внимание лишь намного позднее. Я обращался ко многим производителям стекла, убеждая их взяться за производство требуемого чистого стекла. В конце концов отозвался Corning, где Боб Маурер возглавил первую группу, которая впоследствии выпускала стеклянные стержни и разработала метод изготовления стекловолокна с требуемыми параметрами.

Тем временем я продолжал работать, с тем чтобы доказать возможность использования стекловолокна как среды для дальней оптической связи. Стоял ряд трудно-разрешимых задач. Первая трудность состояла в проведении измерений на образцах с малым поглощением, которые имели длину всего около 20 см. Было также сложно обеспечить совершенство поверхности. Ещё одно осложнение возникало из-за потерь при отражении от торца и было связано с процессом полировки. Безвыход-

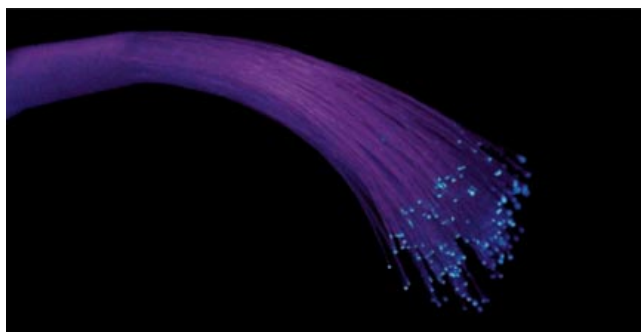


Рис. 4. Стекловолокно.

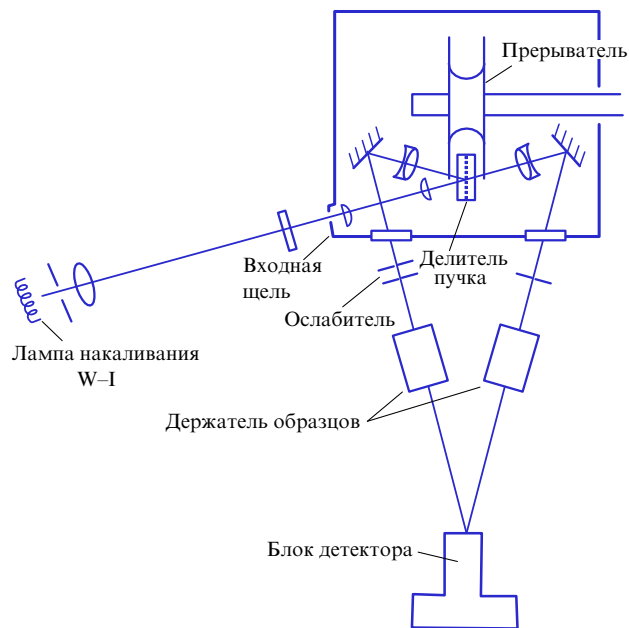


Рис. 5. Двухлучевой спектрофотометр (из работы [12]).

ное положение было и с измерениями, когда требовалось выявить различие в потерях двух образцов с точностью не хуже 10^{-3} . Это при том, что сами потери в 20-сантиметровом образце составляли лишь 0,1 %. Неточные измерения были бы бессмысленными.

В 1968 и 1969 гг. я и мои коллеги в STL Т.В. Девис, М.В. Джонс и Ч.Р. Райт опубликовали серию статей [11–13] по измерению коэффициента затухания в стекле, посвящённых этим задачам. Измерительные приборы, называвшиеся спектрофотометрами, в то время имели весьма ограниченную чувствительность — около 43 дБ км^{-1} . Измерения были исключительно трудными: даже лёгкое загрязнение могло привести к потерям, сравнимым с собственно затуханием, тогда как поверхностные эффекты могли быть в десять раз сильнее. Мы собрали самодельный однолучевой спектрофотометр с чувствительностью $21,7 \text{ дБ км}^{-1}$. Позднее усовершенствованный двухлучевой спектрофотометр достиг чувствительности $4,3 \text{ дБ км}^{-1}$.

Эффект отражения исследовался с помощью самодельного эллипсометра. Измерения проводились на образцах из плавленого кварца, изготовленных методом плазменного осаждения, когда ионы примеси испарялись при высокой температуре. С использованием высокочувствительного прибора было измерено затухание в ряде образцов стекла и, эврика!, в стекле Infrasil от Schott Glass был измерен коэффициент затухания всего лишь 5 дБ км^{-1} в спектральном окне в окрестности $0,85 \text{ мкм}$ (рис. 6). Мы, наконец, доказали, что удаление примесей понижает потери на поглощение до приемлемого уровня.

Это было волнующим событием, поскольку область низких потерь пришлась как раз на полосу излучения GaAs-лазера. Измерения ясно указали путь к оптической связи: компактный полупроводниковый GaAs-лазер в качестве источника, обладающий низкими потерями волоконный световод в оболочке как проводящая среда, а также кремниевые или германиевые полупроводнико-

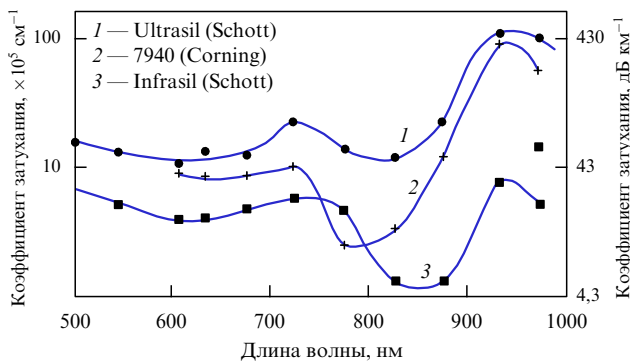


Рис. 6. Коэффициент затухания в стекле как функция длины волны (из работы [12]).

вые детекторы [12, 14]. Мечта уже не казалась такой далёкой. Эти измерения очевидно изменили отношение научного сообщества на противоположное. Началась гонка по разработке первого волновода на основе стекловолокна с низкими потерями.

На фирме Corning в 1967 г. коллега-химик Маурера П. Шульц помог получить чистое стекло. В 1968 г. его коллеги Д. Кек и Ф. Займар помогли вытянуть волокна. К 1970 г. в Corning изготовили волоконный волновод с потерями 17 дБ км^{-1} на длине волны $0,633 \text{ мкм}$ с сердцевинной, полученной диффузией титана, и кварцевой оболочкой, используя метод внешнего осаждения из паровой фазы (OVD) [15]. Два года спустя они понизили потери до 4 дБ км^{-1} для многомодового волокна, заменив сердцевину, легированную титаном, на сердцевину, легированную германием.

В конце концов в 1969 г. Bell Laboratories развернули программу оптоволоконных исследований. Их работа над полыми волноводами была полностью остановлена в 1972 г. Исследовательская программа Bell Laboratories в области миллиметровых волн постепенно сходилась на нет и была окончательно прекращена в 1975 г.

6. Влияние на мир

С момента развертывания в 1976 г. оптоволоконной системы связи первого поколения с пропускной способностью 45 Мб с^{-1} пропускная способность одиночного волокна быстро возрастала: в настоящее время речь идет о терабитах в секунду. Для выявления фундаментальных ограничений оптоволоконной связи в 1982–1985 гг. был запущен [16] оптоэлектронный проект "Терабит в секунду", к которому было привлечено десять исследовательских организаций. Цель разработки — технология, превосходившая существовавшие технические возможности на три порядка величины, — в то время казалась недостижимой. Однако пропускная способность постепенно выросла в миллион раз с десятков мегабит в секунду на начальном этапе до десятков терабит в секунду в последнее время. Благодаря изобретению волоконно-оптических усилителей и уплотнения по длинам волн, данные могут передаваться по волокну на миллионы километров без прохождения через повторители. Вот так развивалась промышленность оптических средств связи.

Благодаря оптоволоконной связи мир совершенно преобразился. Система телефонной связи подверглась модернизации и международные звонки стали легко доступными. Созданы совершенно новые крупные волоконно-оптические производства, включая производство кабелей, оптических устройств, волоконно-оптических сетей и оборудования. В земле и в океане проложены сотни миллионов километров оптоволоконных кабелей, которые и создают сложную связующую инфраструктуру, лежащую в основе Всемирной паутины. Сегодня Интернет более всеобъемлющ, чем когда-то телефон. Мы просматриваем, ищем, участвуем в Интернет-конференциях, ведём блог, смотрим видео, занимаемся покупками и общаемся в режиме онлайн. Информационная революция, начавшаяся в 1990-х годах, не могла бы состояться без оптических волокон. За последние несколько лет волокна были проложены вплоть до наших домов. Обсуждаются чисто оптические сети, являющиеся безупречными с экологической точки зрения. Революция в оптоволоконной связи не закончилась — возможно, она только начинается.

7. Заключение

Всемирная сеть связи, основанная на оптоволокне, действительно сделала мир теснее и сблизила людей. Едва ли следует приводить цифры, чтобы доказать это. Новость о присуждении мне Нобелевской премии пришла ко мне в 3 часа утра в Калифорнии с телефонным звонком из Стокгольма (где в это время было утро), который несомненно прошёл по оптоволокну; буквально через несколько минут я уже получал поздравления от моих друзей из Азии (для которых был уже вечер) — и опять звонки приходили по оптическим волокнам. Слишком много информации — это не всегда хорошо: в ту ночь нам пришлось отключить телефон, чтобы немного поспать.

За последние двадцать лет творческие умы нашли немало оригинальных путей для использования широкой полосы пропускания, предоставляемой оптическими волокнами. Сегодня оптическая связь — это не просто техническое достижение. Она привела к серьёзным изменениям в обществе. Она будет продолжать изменять то, как люди обучаются, как живут и общаются между собой, а также то, как они работают. Например, все элементы и части единого изделия могут изготавливаться в десятках мест по всему миру, предоставляя большие возможности людям во всём мире. Доступность информации со всей очевидностью привела к большему равенству и более широкому участию в общественных делах. Эволюция продолжается. Кто знает, что ещё придумают другие мудрецы в будущем. Неиспользованная часть полосы пропускания манит и соблазняет. Много слов сказано и немало книг написано об информационном обществе, и я ничего не хочу добавить здесь от себя. Я лишь отмечу, что действительность далеко превзошла мечту и первый серьёзный замысел оптической связи в 1966 году, когда даже об 1 ГГц можно было лишь мечтать.

Я выражаю благодарность корпорации ИТТ, где я проработал 30 лет, и всем тем, кто примкнул ко мне на ранней стадии, ибо без множества сторонников отрасль (оптической связи — *Примеч. перев.*) не развивалась бы так, как мы это видим сегодня. Я посадил зёрнышко; Боб

Маурер поливал его, а Джон Мак-Чесни прорастил корни.

Перевёл с английского *Е.Н. Рагозин*
 Научная редакция перевода *М.А. Трищенко*

Список литературы

1. Kao K C, Hockham G A "Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies" *Proc. IEE* **113** 1151 (1966); republished, in *Proc. IEE J. Optoelectron.* **133** (3) 191 (1986)
2. Kao K C *A Time and a Tide: Autobiography of Charles K Kao* (in Chinese) (Joint Publ., 2005)
3. Kao K C "Optical communication systems", in *Opto-electronics, Lectures at the 1982 International Summer School at The Chinese University of Hong Kong, 26 July–6 August 1982* (Ed. K Young) (Hong Kong: The Chinese Univ. of Hong Kong Press, 1982) pp. 3–100
4. Barlow H E M, Karbowiak A E "An experimental investigation of the properties of corrugated cylindrical surface waveguides" *Proc. IEE Pt. III* **101** 182 (1954)
5. Kao K C "Electromagnetic wave propagation on a double-layer dielectric film" *Electron. Lett.* **1** (2) 35 (1965)
6. Karbowiak A E "New type of waveguide for light and infrared waves" *Electron. Lett.* **1** (2) 47 (1965)
7. Dyott R "Some memories of the early years with optical fibres at the British Post Office: a personal account" *Proc. IEE* **133** 199 (1986)
8. Gambling W A "Optical fibres: the Southampton scene" *Proc. IEE.* **133** 205 (1986)
9. STC Press Office, "STL develops techniques aimed at communication by guided light. British Team's Work described at IEE Meeting in London", January, 1966
10. Williams D, Kao K C "Pulse communication along glass fibers" *Proc. IEEE* **56** (2) 197 (1968)
11. Kao K C, Davies T W "Spectrophotometric studies of ultra low loss optical glasses I: single beam method" *J. Phys. E* **1** 1063 (1968)
12. Jones M W, Kao K C "Spectrophotometric studies of ultra low loss optical glasses II: double beam method" *J. Phys. E* **2** 331 (1969)
13. Wright C R, Kao K C, "Spectrophotometric studies of ultra low loss optical glasses III: ellisometric determination of surface reflectances" *J. Phys. E* **2** 579 (1969)
14. Lytollis J, Kao C K, Turner G I "Infra-red optical communication systems" *Infrared Phys.* **8** (1) 123 (1968)
15. Kapron F P, Keck D B, Maurer R D "Radiation losses in glass optical waveguides" *Appl. Phys. Lett.* **17** 423 (1970)
16. Kao C K "1012 bit/s optoelectronics technology" *Proc. IEE* **133** 230 (1986)