

УДК 378.016[534+535+537]

**ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ  
ПО АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИИ КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН**

*Ю. И. Кызыласов, С. Н. Бурсов*

**DEMONSTRATION EXPERIMENT  
ON AMPLITUDE MODULATION OF FLUCTUATIONS AND WAVES**

*Yu. I. Kyzylasov, S. N. Bursov*

В статье рассмотрено несколько вариантов изложения в курсе общей физики вопросов об амплитудной модуляции колебаний и волн. Предложены описания оригинальных лекционных демонстраций с помощью анализатора спектров и He-Ne-лазера.

Paper considers several ways of presenting the issues of amplitude modulation of fluctuations and waves in the course of General Physics. Some original lecture demonstrations with the aid of the spectrum analyzer and He-Ne-laser are proposed.

**Ключевые слова:** модуляция, спектр, частота, анализатор спектра, колебания.

**Keywords:** modulation, spectrum, frequency, spectrum analyzer, fluctuation.

В экспериментальном курсе физики демонстрации – не дополнение к теоретическому изложению курса, а его неотъемлемая, органическая часть. Они не только форма преподавания. Демонстрации составляют значительную часть содержания экспериментального курса. Как правило, все основные явления, составляющие предмет лекции в вузе или школе, должны демонстрироваться на опыте. Не случайно, известный ученый и вузовский преподаватель академик Г. С. Ландсберг всегда подчеркивал: «Университетское преподавание физики располагает мощным вспомогательным средством в виде физических демонстраций. При чтении курса я обращал большое внимание на эту сторону дела» [5]. В методическом отношении демонстрации делают всякое явление более ясным для слушателей, чем при словесном его описании и содействуют более легкому усвоению и запоминанию фактов. Естественно, прежде всего должны быть показаны процессы, явления и закономерности, которые служат определяющими для того или иного раздела. Прочное усвоение этого материала необходимо для дальнейшего нормального прохождения курса. При этом следует соблюдать меру в отношении числа демонстраций: оно не должно быть слишком велико, но и не должно быть скудным, иначе длительное словесное изложение материала может притушить внимание слушателей. В работе [3] один из авторов впервые показал, что всегда можно организовать такие «сквозные» демонстрации, которые можно показывать вновь и вновь на различных этапах преподавания курсов общей физики.

В настоящей работе мы хотели бы на конкретном примере рассмотреть вопросы технологии и методики преподавания программной темы «Амплитудная модуляция колебаний и волн». Дело в том, что гармонические колебания и волны определенной частоты и амплитуды не могут нести информацию о сигнале, поскольку каждый последующий цикл колебаний является точной копией предыдущего. Чтобы передать определенную информацию с такой волной, ее нужно промодулировать, т. е. изменить какой-то параметр волны в соответствии с изменением смыслового сиг-

нала. В бегущей волне такими изменяемыми параметрами могут быть амплитуда, частота и фаза. Соответственно различают амплитудную, частотную и фазовую модуляции. Амплитудная модуляция в технике связи с помощью электромагнитных волн широко использовалась в начале XX века в передатчиках телефонных сигналов. Правда, эффективность такой модуляции мала, она по-прежнему востребована. Широкое распространение на УКВ-диапазоне в настоящее время для так называемой «гражданской» связи, получили частотная и фазовая модуляции. Рядом неоспоримых достоинств обладает и угловая модуляция, объединяющая названные выше. Итак, первый демонстрационный опыт по амплитудной модуляции как в школе, так и в университете, нами ставится по классической схеме [1] с использованием звукового генератора на частоте  $\sim 18$  кГц, осциллографа, угольного микрофона и камертона с резонатором. Звучание камертона приводит в движение мембрану микрофона.

При изменении давления мембраны на угольные зерна их сопротивление начинает изменяться. В такт с изменением сопротивления изменяется сила тока в микрофоне, а следовательно, и напряжение на его зажимах. Амплитуда колебаний несущей частоты периодически возрастает и убывает с частотой колебаний камертона.

Рассмотренный опыт служит лишь для начального формирования понятия амплитудной модуляции. Возникает, правда, проблемная ситуация, разрешить которую можно, если получить ответы на следующие вопросы.

1. Каким набором частот следует характеризовать модулированную по амплитуде волну, каков ее спектр?
2. Изменяется ли спектр модулированной волны, если модулирующий сигнал периодический и гармонический, периодический, но не гармонический и, наконец, не периодический и не гармонический?
3. Можно ли указать и рассмотреть какое-либо фундаментальное явление, в понимании которого ме-

ханизм амплитудной модуляции сыграл бы решающую роль?

Ответ на первый вопрос очевиден. Представим себе, что колебания напряженности электрического поля  $\vec{E}(t)$  в электромагнитной волне происходят по гармоническому закону с амплитудой  $\vec{E}_0$  и частотой  $\omega$ . Пусть модулирующее поле также носит гармонический характер

$$\vec{E}_m(t) = \vec{E}_{o,m} \cos \Omega t, \quad (1)$$

где  $\Omega \ll \omega$ ,  $\vec{E}_{o,m} < \vec{E}_0$  квадрат.

Тогда для  $\vec{E}(t)$  запишем:

$$\vec{E}(t) = \left[ \vec{E}_0 + E_m(t) \right] \cos \omega t. \quad (2)$$

С учетом (1) окончательно:

$$\begin{aligned} \vec{E}(t) = & \vec{E}_0 \cos \omega t + \frac{1}{2} E_{o,m} \cos(\omega + \Omega)t + \\ & + \frac{1}{2} \vec{E}_{o,m} \cos(\omega - \Omega)t. \end{aligned} \quad (3)$$

Следовательно, промодулированное по амплитуде колебание  $\vec{E}(t)$ , характеризуется не двумя частотами  $\omega$  и  $\Omega$ , а тремя –  $\omega$ ,  $\omega + \Omega$ ,  $\omega - \Omega$ , что давно известно в технике связи. И не только! [2].

Обще признано, что одним из важнейших достижений оптики XX века, является работа, выполненная в нашей стране Г. С. Ландсбергом и Л. И. Мандельштамом. Реакция на доклад ученых на оптическом семинаре в Москве в апреле 1928 года лучше всего была выражена, пожалуй, в словах одного из слушателей: «Этого не может быть, потому, что, если бы это было так, то это означало бы, что мы видим как «говорит» молекула». Но чуда не было! Ученые в самом деле увидели как «разговаривает» молекула и хорошо поняли эту речь по спектрам, открытого ими, комбинационного рассеяния. С методической точки зрения при изучении в курсе оптики вопросов, связанных с природой рассеяния света, весьма полезно вспомнить историю. Дело в том, что данному открытию предшествовали исследования явления модуляции световой волны рассеянного света упругими дебаевскими тепловыми волнами в монокристалле кварца, в котором скорость волн достаточно велика ( $\sim 6000$  м/с).

В экспериментальном плане возникла трудная задача найти достаточно совершенный монокристалл кварца. Было известно, что бывшие знатные российские фамилии имели не только свой герб, но и свою печать, изготовленную, как правило, из лучших кусков горного хрусталя, или, иначе, кристаллического кварца. Трудно сказать, какой путь проделали кварцевые печати, но в конце пути их немало оказалось в антикварных и комиссионных магазинах (рис. 1).

Там-то и рассматривал и приобретал их за личные деньги Г. С. Ландсберг, вызывая немалое удивление продавцов и случайных свидетелей этих его покупок. Затем из подходящих печатей вырезались качественные образцы для научной работы. Первые результаты количественных измерений касались установления

зависимости интенсивности рассеяния от температуры, а в 1927 г. начались весьма непростые спектральные исследования. При длительных многочасовых экспозициях впервые были зарегистрированы в окрестностях разных линий дополнительные линии – сателлиты, не наблюдавшиеся в спектре возбуждающего света. Особенно отчетливо сателлиты ( $\omega + \Omega$ ,  $\omega - \Omega$ ) проявлялись вблизи наиболее интенсивной линии ртутного спектра  $\lambda = 253,7$  нм.



Рис. 1. Печать из горного хрусталя

Неожиданным и удивительным оказалось то, что частотные смещения ( $\Omega$ ) по величине оказались существенно больше, чем следовало ожидать для эффекта модуляции рассеянного света упругими тепловыми волнами.

И, наконец, трудоемкие эксперименты убедили Г. С. Ландсберга и Л. И. Мандельштама в том, что они открыли новое оптическое явление – комбинационное рассеяние света. Несколько позже подобное явление наблюдали Ч. В. Раман и К. С. Кришнан в Индии. Ландсберг так комментировал суть открытия: «Подобно тому, как принимая модулированные колебания, мы слышим голос говорящего перед микрофоном, так, наблюдая спектр комбинационного рассеяния света, мы, так сказать, слышим рассказ молекулы об особенностях происходящих в ней процессов» [6].

В такт колебаниям ядер молекул или кристаллической решетки происходит деформация электронной оболочки, что ведет к периодическому изменению поляризуемости, а следовательно, и наведенного световой волной электрического момента. Если временная часть падающей волны света частоты  $\omega = 2\pi\nu$  представлена выражением  $\vec{E} = \vec{E}_0 \cos \omega t$ , то наведенный электрический момент в самом простом случае для единственной частоты колебания системы будет равен:

$$\vec{p} = \alpha(q) \vec{E} \cos \omega t, \quad (4)$$

где  $\alpha(g)$  – поляризуемость как функция координат элементов колеблющейся системы.

В общем случае эта величина тензорная. Не касаясь некоторых тонкостей, связанных с тензорным характером  $\alpha(g)$  и возможным вращением молекулы,

будем считать, что в результате синусоидальных колебаний системы при малых отклонениях от  $g = 0$ ,  $\alpha(g)$  можно представить в виде ряда:

$$\alpha(q) = \alpha(0) + \left( \frac{\partial \alpha}{\partial q} \right) q_0 \cos(\Omega t + \varphi), \quad (5)$$

где  $\varphi$  – произвольная фаза, различная для разных колеблющихся элементов (например, молекул –), а  $\Omega$  – инфракрасная частота колебаний системы.

Подставим (5) в (4) и после элементарных тригонометрических преобразований получим:

$$\begin{aligned} \vec{p} = & \alpha(0) \vec{E}_0 \cos \omega t + \\ & + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \alpha}{\partial q} \right) q_0 \vec{E}_0 \{ \cos[(\omega + \Omega)t + \varphi] + \\ & + \cos[(\omega - \Omega)t - \varphi] \}. \end{aligned} \quad (6)$$

Поскольку излучение вторичных волн или, попросту, рассеяние света будет определяться наведенным моментом  $\vec{p}$ , следовательно, помимо света первоначальной частоты  $\omega$  в рассеянном свете будет также присутствовать свет измененной частоты  $\omega + \Omega$  и  $\omega - \Omega$ . Если система имеет  $i$  частот колебаний, то полученный результат нетрудно обобщить и на этот случай. Тогда сразу станет ясно, что в рассеянном свете нужно ожидать спутников с частотами  $\omega \pm \Omega_i$ . В этом и состояла сущность объяснения, которое дали Ландсберг и Мандельштам наблюдавшемуся ими явлению. Отметим также, что произвольность фазы  $\varphi$  делает излучение отдельных молекул или частей системы некогерентным. Ученые хорошо понимали и ту огромную роль, которую суждено было сыграть новому явлению в естествознании. Спектры комбинационного рассеяния настолько характерны для молекул, что с их помощью оказывается возможным проведение анализа сложных молекулярных смесей, особенно органических молекул, где химические методы анализа весьма затруднены или даже невозможны. Следует отметить, что в тексте этой работы мы касались теории комбинационного рассеяния в рамках классических представлений, но полное решение вопроса следует искать в более совершенной квантовой теории.

Итак, если предварительно рассмотрены некоторые конкретные примеры модуляции (акустика, радиосвязь, телевидение, оптика...) колебаний и волн, а также обращено внимание на возможность раскрытия суть рядов Фурье в математике, то с неизбежностью возникает проблема постановки запоминающегося, и закрепляющего понимание, демонстрационного эксперимента.

Нами предлагается следующий вариант такой демонстрации. Комплекс используемой аппаратуры представлен на рис. 2.

Он включает в себя анализатор спектра (СКЧ-59) и два генератора, конструктивно выполненных в одном блоке. Один из генераторов, стабилизированный кварцевым резонатором, дает сигнал на несущей частоте  $\nu = 4,43$  МГц ( $\omega = 2\nu$ ). Частотный спектр представлен на рис. 3.

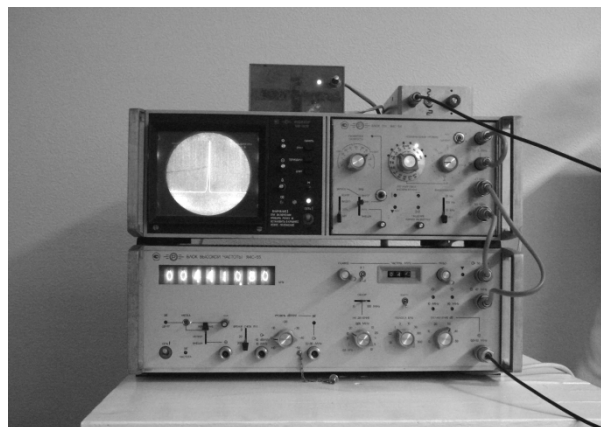


Рис. 2. Анализатор спектра и генераторы сигналов

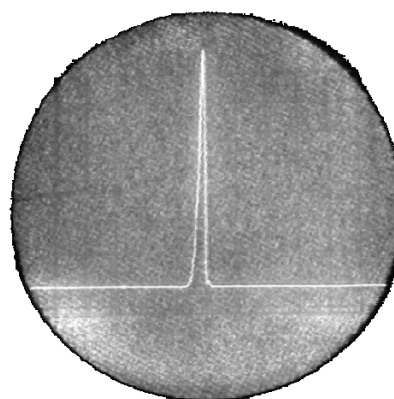


Рис. 3. Спектр немодулированных колебаний

Второй генератор RC-типа собран на логических элементах и формирует модулирующий, периодический, симметричный и прямоугольный по форме сигнал на частоте  $\Omega = 10$  кГц.

Методом фильтрации этого сигнала двухзвенным LC-фильтром можно получить также сигнал периодический, но гармонический, на той же частоте 10 кГц. Частота среза фильтра подбирается при этом таким образом, что на выходе остается первая гармоника, имеющая, как известно, синусоидальную форму. Оба сигнала – несущий и модулирующий – подаются на соответствующие входы модулятора. С выхода последнего и снимается конечный сигнал для визуального наблюдения на экране анализатора спектра.

На рис. 4 совершенно отчетливо смотрится спектр модулированного колебания напряжения для случая, когда модулирующий сигнал имел периодический и гармонический характеры. В спектре три линии на частотах  $\omega$ ,  $\omega + \Omega$  и  $\omega - \Omega$ . Эта картина позволяет, в частности, преподавателю обратиться к разъяснению такого явления, как молекулярное рассеяние света. Временные изменения оптических неоднородностей среды, вызванных флуктуациями энтропии или температуры, подчиняются уравнению температуропроводности, решение которого в данном случае дает экспоненциальную зависимость от времени [2]. Следовательно, функция модулирующая амплитуду световой волны, экспоненциально зависит от времени и в рассеянном свете возникает спектральная линия с

максимумом на частоте возбуждающего света  $\omega$  – центральная компонента [6]. Адиабатические же флуктуации плотности или флуктуации давления можно рассматривать как совокупность упругих волн с частотами  $\sim 10^9$  Гц (гиперзвук), распространяющихся в чистой среде по всевозможным направлениям. Компоненты тонкой структуры линии рассеянного света ( $\omega + \Omega$ ,  $\omega - \Omega$ ) называют теперь компонентами Мандельштама-Бриллюэна. Следовательно, если рассеяние возбуждать монохроматическим светом, то в рассеянном свете должен наблюдаться триплет ( $\omega$ ,  $\omega + \Omega$ ,  $\omega - \Omega$ ). Именно это явление – модуляцию световой волны рассеянного света упругими дебаевскими тепловыми волнами – искали Г. С. Ландсберг и Л. И. Мандельштам в монокристалле кварца. Нашли же они комбинационное рассеяние света.

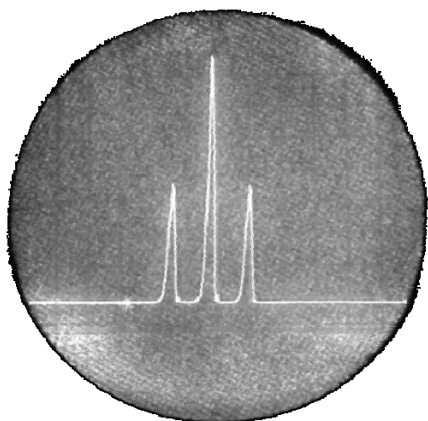


Рис. 4. Спектр колебаний промодулированных гармоническим сигналом

На рис. 5 показан снимок частотного спектра промодулированного сигнала для случая, когда модулирующий сигнал носит периодический, но не гармонический характер и, следовательно, может быть представлен рядом Фурье. В данном конкретном случае видны нечетные члены ряда с частотами  $\omega$ ,  $\omega \pm \Omega$ ,  $\omega \pm 3\Omega$ ,  $\omega \pm 5\Omega$ .

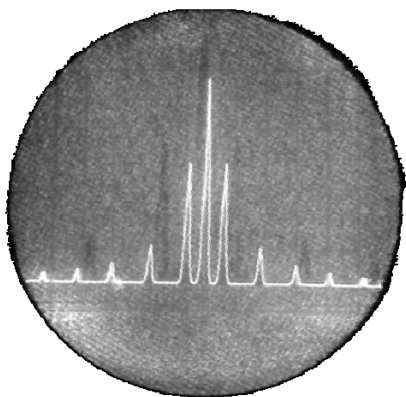


Рис. 5. Спектр колебаний промодулированных периодическим, но не гармоническим сигналом

С появлением лазеров в 1960 г. открылись необычайно широкие возможности для передачи информации электромагнитным излучением на частотах видимого света. В настоящее время существует несколько

методов, которые позволяют модулировать выходное излучение лазеров аналогично тому, как в радио или телепередачике модулируется несущая электромагнитная волна. Нетрудно оценить частотный диапазон видимой области спектра от красного ( $\lambda = 650$  нм) до голубого ( $\lambda = 450$  нм) света. Он составляет  $\sim 2 \cdot 10^8$  МГц. Если принять, что на один телевизионный канал нужна полоса частот шириной  $\sim 10$  МГц, то в видимой области спектра, в принципе, можно создать  $2 \cdot 10^7$  перекрывающихся телевизионных каналов.

Простейший вариант демонстрации амплитудной модуляции излучения He-Ne-лазера реализован нами и представлен на рис. 6.

С помощью гибкого светопровода луч лазера направляется на кремниевый фотодиод, напряжение с которого подается на вход усилителя низкой частоты. К выходу усилителя подключены осциллограф и громкоговоритель. Перекрывая луч поперечным движением разведенных пальцев кисти руки или расчески, можно и «увидеть» и «услышать» результат модуляции. Рассмотренная установка служит в качестве регистрирующей для следующей демонстрации, передающая часть которой в развернутом виде представлена на рис. 7.



Рис. 6. Регистрирующая установка (источник излучения находится вне рисунка)

Направление поляризации излучения лазера установлено под углом  $\sim 45^\circ$  с оптической, горизонтальной осью ячейки. После ячейки эллиптически поляризованный свет проходит через вторую линзу и анализатор (призма Николя). Наличие анализатора имеет принципиально важное значение (классическая схема по наблюдению хроматической поляризации). Он сводит оба луча, поляризованные во взаимно перпендикулярных плоскостях в одну плоскость. В зависимости от разности фаз, приобретенной в ячейке, прошедшие лучи формируют интерференционную картину.

Линейно-поляризованное излучение He-Ne-лазера фокусируется первой линзой телескопической системы в промежуток между электродами ячейки Керра с нитробензолом, находящимися под постоянным напряжением величиной  $\sim 1200$  В. Минимальное расстояние между почти плоскими электродами  $\sim 1$  мм. Длина электродов по ходу луча  $\sim 20$  мм. Под действием по-

стоянного электрического поля нитробензол становится анизотропным. Возникает явление двойного лучепреломления. Поляризуемость вещества вдоль направления поля и перпендикулярно ему становится различной, различными будут и диэлектрическая проницаемость, и показатели преломления ( $n_0$ ,  $n_c$ ).



*Рис. 7. Установка для передачи музыки по лазерному лучу*

В комплект установки входит музыкальный центр, с усилителя которого на те же электроды ячей-

ки подается напряжение амплитудой порядка 100 В, меняющееся со звуковой частотой. Соединение, естественно, осуществляется через развязывающий конденсатор. В итоге за анализатором будет луч с переменной интенсивностью. Таким образом происходит превращение электрических колебаний в колебания светового потока, т. е. модуляция лазерного излучения, попадающего на регистрирующую установку (рис. 6).

В процессе преподавания физики преподаватели учебных заведений любого типа часто ставят демонстрационные опыты, производящие сильное впечатление на обучаемых. В нашей практике описанная выше демонстрация передачи звуковой информации по лазерному лучу вызывает не просто удивление, а подлинный восторг, за которым немедленно следуют заинтересованное обсуждение роли всех элементов установки и многочисленные вопросы. И это очень важно.

В заключении необходимо отметить, что рассмотрение вопросов о возможных способах модуляции колебаний и волн представляет собой непрерывный процесс при изучении различных разделов физики. Приведенный в статье материал отражает наши подходы к такой методике преподавания, чтобы обеспечить преемственность в формировании устойчивых представлений о существовании физических явлений [3; 4].

### Литература

1. Демонстрационный эксперимент по физике в старших классах средней школы / В. А. Буров [и др.]. – Ч. 2. – М.: Просвещение, 1972. – 444 с.
2. Кызыласов, Ю. И. Вынужденное молекулярное рассеяние света в конденсированных средах / Ю. И. Кызыласов // Труды ФИАН. – Т. 72. – М.: Наука, 1974. – С. 66 – 104.
3. Кызыласов, Ю. И. От волн на струне до волн де Бройля / Ю. И. Кызыласов // Вестник КемГУ. – 2010. – № 4. – С. 112 – 119.
4. Кызыласов, Ю. И. Оптический практикум в системе непрерывного образования КемГУ / Ю. И. Кызыласов // Материалы Международной школы-семинара «Физика в системе высшего и среднего образования». – М., 2011. – С. 176 – 177.
5. Ландсберг, Г. С. Оптика / Г. С. Ландсберг. – М.: Физматлит, 2010. – 848 с.
6. Фабелинский, И. Л. Открытие комбинационного рассеяния света / И. Л. Фабелинский // Успехи физических наук. – 1978. – Т. 126. – № 1. – С. 124 – 152.

### Информация об авторах:

**Кызыласов Юрий Иванович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики КемГУ, 8-913-404-66-61.

**Yuriy I. Kyzylasov** – Candidate of Physics and Mathematics, Assistant Professor at the Department of General Physics, Kemerovo State University.

**Бурсов Сергей Николаевич** – инженер кафедры общей физики КемГУ.

**Sergey N. Bursov** – engineer at the Department of General Physics, Kemerovo State University.

*Статья поступила в редколлегию 08.11.2013 г.*