

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ГЕТЕРОДИНИРОВАНИЕ СВЕТА

С. И. Боровицкий и Г. С. Горелик

Недавно появилась статья Форрестера, Гудмундсена и Джонсона¹ с описанием опытов, в которых им удалось получить одно из явлений, которые могут быть описаны как интерференция двух некогерентных световых излучений. Американским исследователям удалось осуществить с помощью специально разработанного для этой цели фотоэлектрического преобразователя гетеродинирование, или, как они выражаются, смешение (mixing) двух оптических спектральных линий, разностная частота которых принадлежит к области сверх-высоких радиочастот.

Идея такого опыта и некоторых других родственных ему опытов была высказана в 1947 г. одним из авторов этого обзора². Независимо через короткое время идею о возможности наблюдать гетеродинирование двух близких оптических спектральных линий высказали Форрестер, Паркинс и Герджой³.

Идея эта элементарна *).

Рассмотрим оптическое излучение, спектр которого имеет вид, показанный на рис. 1. По оси абсцисс отложена частота, по оси ординат — спектральная плотность. Мы имеем дублет, расщепление которого значительно превышает ширины обеих составляющих. Будем считать, что эти составляющие статистически независимы (некогерентны), например получены от разных источников или от различных атомов одного и того же источника. Тогда временная картина

*) Тем не менее она иногда вызывает возражения, основанные, по нашему мнению, на недостаточном понимании вопросов когерентности. Как сообщил нам недавно С. Я. Брауде, им были высказаны в 1945 г. соображения о возможности гетеродинирования двух некогерентных оптических излучений (работа не опубликована), однако они встретили решительные возражения со стороны некоторых физиков. Подробное разъяснение некоторых вопросов, связанных с возможностью наблюдения интерференции некогерентных оптических излучений, уже было дано на страницах этого журнала⁴ (см. также⁵, стр. 428).

будет иметь вид, изображённый на рис. 2, а. Происходят биения частоты $F = f_2 - f_1$, хаотически модулированные (по амплитуде и фазе) некоторым стационарным случайным процессом. Время корреляции τ этого случайного процесса — порядка $1/\delta$ (время корреляции есть, грубо говоря, время, необходимое в среднем для того, чтобы существенно изменилось значение амплитуды и фазы биений).

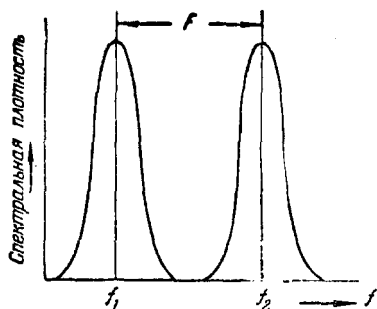


Рис. 1.

Пусть наше излучение падает на катод фотоэлектрического преобразователя. При обычных условиях эксперимента фототок пропорционален среднему значению интенсивности (квадрата амплитуды) света за некоторое время T , определяемое параметрами электрической цепи, причём $T \gg \tau$ («инерционное наблюдение»); T — временная постоянная). Посмотрим, что произойдёт, если электрическая система,

входом которой служит фотоэлектрический преобразователь, способна следить за изменениями фототока, даже весьма быстрым по сравнению с τ . Будем считать, что эмиссионный ток фотокатода пропорционален мгновенному значению интенсивности, т. е. квадрата амплитуды светового колебания (безинерционность фототока). Тогда

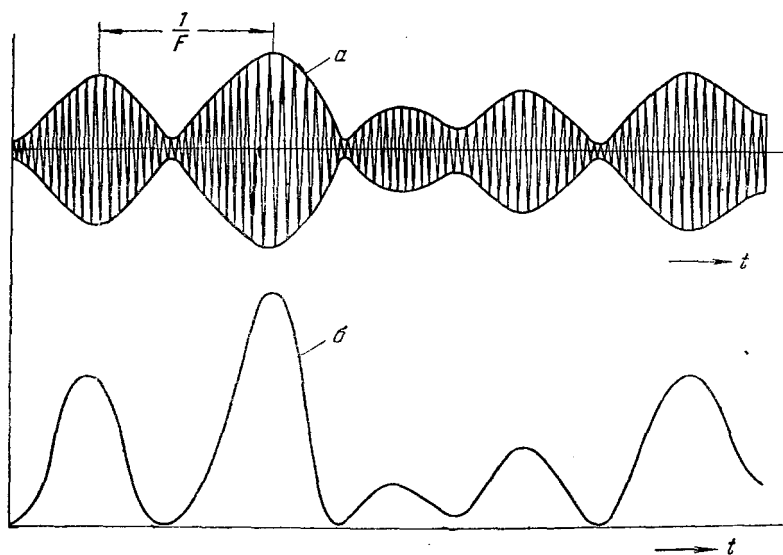


Рис. 2.

входом которой служит фотоэлектрический преобразователь, способна следить за изменениями фототока, даже весьма быстрым по сравнению с τ . Будем считать, что эмиссионный ток фотокатода пропорционален мгновенному значению интенсивности, т. е. квадрата амплитуды светового колебания (безинерционность фототока). Тогда

ток на выходе фотопреобразователя будет иметь такой же вид, как кривая б на рис. 2, т. е. будет представлять собой сумму постоянной слагаемой, низкочастотного шума и хаотически модулированного колебания, имеющего несущую частоту F и время корреляции τ . Спектр фототока будет иметь вид, показанный на рис. 3. Таким образом, получится преобразование частот f_1 и f_2 в разностную частоту F . Это преобразование является нелинейным процессом, аналогичным тому, который происходит при гетеродинировании сигнала в радиоприёмнике. Частоты f_1 и f_2 аналогичны частоте сигнала и частоте местного источника (гетеродина). Нелинейным звеном, необходимым для гетеродинирования, является здесь фотэлектрический преобразователь: фототок является нелинейной (квадратичной) функцией амплитуды света.

Если разность частот f_1 и f_2 , как это легко может быть осуществлено в оптике, порядка 10^{10} гц., F попадает в микроволновой радиодиапазон, и для выделения этой частоты может быть применена современная микроволновая техника. Можно осуществить путём гетеродинирования света преобразование оптического дублета в колебания радиочастоты.

Для простоты изложения мы до сих пор не принимали во внимание дробовый эффект (или, что здесь сводится к тому же, фотонный механизм эмиссии электронов). Это законно лишь, если число

электронов, вылетающих за время порядка $1/F$, очень велико. Как показывают расчёты, такое положение соответствовало бы очень большой — практически недостижимой — средней интенсивности света. В остальных случаях нужно переформулировать наше первоначальное рассуждение, заменив всюду слова «эмиссионный ток», «фототок» словами «вероятность вылета электронов». Именно эта вероятность, а не сам фототок, пропорциональна (в предположении безинерционности фототока) мгновенной интенсивности света. При такой исправленной формулировке кривая б на рис. 2 изображает среднестатистический ход изменения фототока под действием заданного светового колебания. На него накладывается дробовой шум фотокатода, который при реальных условиях эксперимента намного превышает полезный эффект.

Трудность осуществления гетеродинирования света, обусловленная дробовым эффектом, была предусмотрена уже в заметке Форрестера,

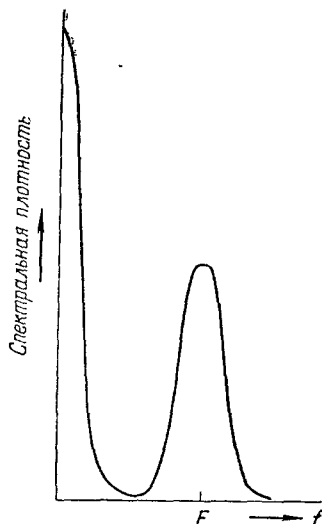


Рис. 3.

Паркинса и Герджоя. Там же было указано, что она может быть преодолена посредством дополнительной (искусственной) периодической модуляции света, по аналогии с приёмом, широко применяемым в радиоастрономии.

Обратим внимание ещё на одно важное обстоятельство. При увеличении поверхности фотокатода общий ток будет увеличиваться и при этом будут уменьшаться его относительные флуктуации, вызванные дробовым эффектом. Но при этом относительная величина полезного эффекта также уменьшается. Из-за конечного размера источника света при увеличении размеров фотокатода исчезает синфазность биений в различных точках фотокатода (биения в достаточно удалённых точках фотокатода некогерентны). Это приводит к сглаживанию пульсаций суммарного фототока: увеличение интенсивности в одних точках фотокатода компенсирует её уменьшение в других точках. Этот эффект тем сильнее выражен, при прочих равных условиях, чем больше размер источника света. Как показывает простой расчёт (см.^{1,2}), пульсации фототока (точнее: пульсации вероятности вылета электронов) остаются практически синфазными на всей поверхности фотокатода, если она не превосходит величину λ^2/Ω , где λ — длина волны, Ω — телесный угол, под которым источник виден с фотокатода.

Гетеродинирование света можно также трактовать как демодуляцию модулированного колебания, временной ход которого показан на рис. 2. Это — лишь один из возможных случаев демодуляции света с помощью радиоэлектронной аппаратуры. Другой возможный случай, уже обсуждавшийся теоретически^{2,4}: выявление хаотической модуляции света, спектр которого представляет собой нерасщеплённую спектральную линию.

Перейдём к изложению эксперимента Форрестера, Гудмундсена и Джонсона.

Основные требования к аппаратуре определяются следующими соображениями. Световые биения, как уже было сказано, сохраняют свою фазу на площадках порядка $\lambda^2/\Omega = A_0$. Средний квадрат I — полезной составляющей фототока частоты биений с каждой такой площадки — по порядку равен среднему квадрату постоянной составляющей фототока с этой же площадки:

$$\bar{I}^2 = \bar{i}_{\text{пост}}^2 = \left(I_{\text{пост}} \frac{A_0}{A} \right)^2 = \left(I_{\text{пост}} \frac{\lambda^2}{A\Omega} \right)^2.$$

Здесь $I_{\text{пост}}$ — постоянная составляющая полного тока, A — площадь фотокатода. Биения на разных площадках статистически независимы. Поэтому средний квадрат полезной составляющей полного фототока $\bar{I}^2$ будет равен $\bar{I}^2 A_0/A$, а спектральная плотность полезного тока определится как

$$\bar{I}_{\omega}^2 = \frac{\bar{I}^2}{\delta} = \frac{I_{\text{пост}}^2 \lambda^2}{A\Omega\delta}.$$

В то же время вследствие дробового эффекта в фототоке присутствует шум, имеющий равномерную спектральную плотность

$$\bar{I}_{\text{дроб}\omega}^2 = 2eI_{\text{пост}}$$

(e — заряд электрона). Так как полоса пропускания призмного тракта, в котором усиливается колебание частоты F , может быть только много меньше δ , отношение полезного сигнала к шуму на входе приёмного тракта будет (по порядку величины)

$$\frac{S}{N} = \frac{\bar{I}_{\omega}^2}{I_{\text{дроб}\omega}^2} = \frac{\lambda^2 I_{\text{пост}}}{2e\delta A\Omega}.$$

Учитывая, что $I_{\text{пост}} = AgB\Omega$, где g — чувствительность фотозлемента, B — яркость источника, получим:

$$\frac{S}{N} = \frac{\lambda^2 g B}{2e\delta^2}.$$

Отсюда видно, что увеличение площади фотокатода сверх величины порядка A_0 не даёт выигрыша в S/N . Однако нужно иметь в виду, что, кроме дробового шума фотопресбразсвателя, в аппаратуре имеются и другие шумы, не зависящие от величины фототока (например, тепловой шум резонатора, настроенного на частоту F). Для того чтобы уменьшить роль этих дополнительных шумов, нужно увеличивать по возможности $I_{\text{пост}}$, а следовательно, площадь фотокатода.

Непосредственное влияние на условия эксперимента оказывает чувствительность фотокатода g . Естественно, выбор останавливается на сурьяно-цезиевом фотокатоде. Его спектральная характеристика такова, что величина $\lambda^2 g$ имеет максимум около $\lambda = 5300 \text{ \AA}$. Источник света должен давать линию с длиной волны, близкой к этому значению и с возможно большим значением отношения B/δ — спектральной плотности яркости. Этим требованиям удовлетворяет очень яркая зелёная линия ртути $\lambda = 5461 \text{ \AA}$. Благодаря большому атомному весу ртути её доплеровское уширение мало. Работая с чистым изотопом, можно избавиться от уширения, связанного со сверхтонкой структурой. Кроме того, зелёная линия ртути имеет те преимущества, что является стандартной для пластинки в полволны (см. ниже) и для просветлённой оптики. Её легко отделить от остальных линий с помощью светофильтра. В магнитном поле линия даёт зеемановское расщепление, схема которого приводится на рис. 4. Компоненты π , отложенные вверх от горизонтальной линии, поляризованы вдоль поля, σ — отложенные вниз — поперёк поля.

В экспериментах измерялись биения между σ -компонентами. Источником света служила безэлектродная трубка, заполненная изо-

топсм Hg^{202} и возбуждаемая пелем частоты 2450 Мгц. Для того, чтобы избежать самопоглощения линии, трубка была сделана плоской, толщиной 0,1 см; свет проходил через её широкие стороны.

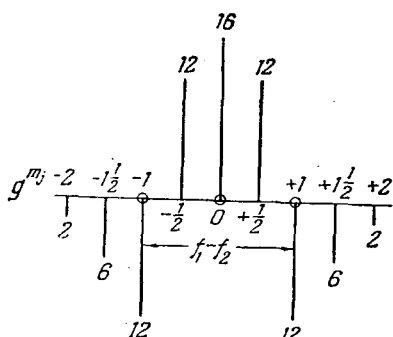


Рис. 4.

При $\delta = 8 \cdot 10^8$ гц, $A\Omega = 0,7 \text{ см}^2 \times$
 $\times$ *стерадиан* от σ -компонент полу-
 чился ток $3,88 \cdot 10^{-6}$ а, что соответ-
 ствует $S/N = 10^{-4}$. Следовательно,
 чтобы наблюдать эффект гетероди-
 нирования света, нужно применить
 модуляционное устройство с выи-
 грешем порядка 10^4 . Трудность
 создания такого устройства за-
 ключается в том, что оно должно
 периодически изменять полезный
 сигнал, составляя при этом прак-
 тически постоянный дробовой шум.
 Последнее требование можно сфор-
 мулировать точнее: постоянная сла-

гаемая фототок должна изменяться в результате модуляции не больше, чем на 10^{-5} от своей средней величины.

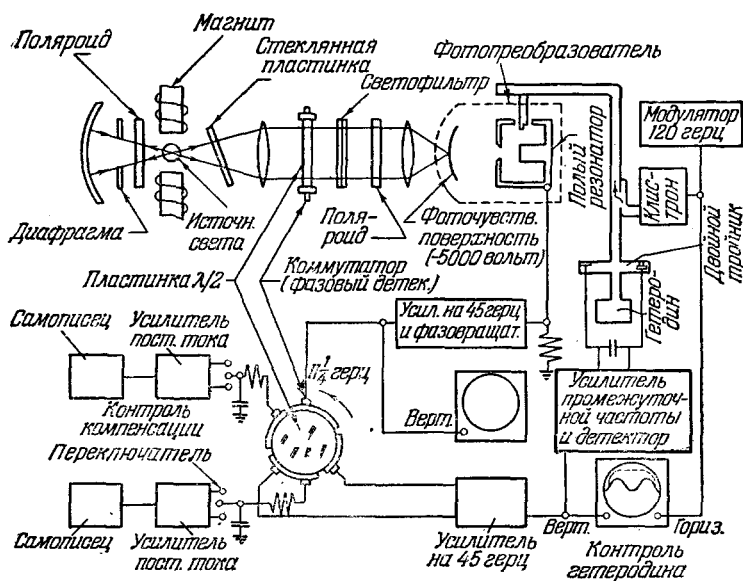


Рис. 5.

Модулятор, удовлетворяющий этому требованию, удалось осу-
 шествить следующим образом (рис. 5). Свет, идущий от источника
 вправо и содержащий π - и σ -компоненты, проходит через пластин-

ку $\lambda/2$, вращающуюся с частотой $11\frac{1}{4}$ гц. Затем свет проходит через поляриод. На фотокатод при этом падает линейно поляризованный свет, в котором компоненты π и σ сменяют друг друга с частотой 45 гц (учетверённой частотой вращения пластинки $\lambda/2$). Полезный эффект модулируется так же, как меняется прохождение σ -компонент. Если бы π - и σ -компоненты имели строго одинаковую интенсивность, полный ток при этом оставался бы постоянным. Однако в действительности свет, излучаемый источником, оказывается частично поляризованным, и в полном токе гоявляется составляющая частоты модуляции. Эта паразитная модуляция уменьшается до безопасной величины с помощью наклонной стеклянной пластинки и устройства, состоящего из расположенных слева от источника поляроида, диафрагмы и сферического зеркала, отражающего свет сквозь источник вправо.

Паразитная модуляция контролируется прибором, включённым на выходе цепи, состоящей из узкополосного усилителя на 45 гц, фазовращателя, фазового детектора с большой постоянной времени и усилителя постоянного тока.

Важнейшей частью установки является фотоэлектрический преобразователь, создание которого потребовало большого экспериментального искусства. Преобразователь (рис. 6) заключён в стеклянную откачанную колбу со сферическим передним дном. На это дно нанесён платиновый проводящий слой, окно в котором представляет собой полупрозрачный сурьмяно-цезиевый катод. Внутри помещается фокусирующая система из молибденовых электродов: сферического и цилиндрического. В цилиндрическом электроде имеется окно для пролёта фотоэлектронов, закрытое мелкой вольфрамовой сеткой. Третий, плоский электрод с отверстием в середине расположен около резонатора, его назначение — предотвратить попадание в резонатор посторонних электронов. Фотоэлектроны, ускоряясь в сферическом конденсаторе, сформированном дном и первым электродом, пролетают в отверстие торoidalного резонатора, имеющего собственную частоту, близкую к частоте биений, и возбуждают его. Для того, чтобы условия возбуждения были наилучшими, резонатор должен иметь большое шунтовое сопротивление: зазор между передней стенкой и центральным стержнем нужно увеличивать. При этом время пролёта электронов через зазор должно составлять малым по сравнению с периодом колебаний резонатора. Следовательно, электроны должны иметь большие скорости. В процессе нанесения фоточувствительного слоя цезий оседает на пирексовое стекло баллона, и проводимость увеличивается настолько, что преобразователь не может выдержать необходимое напряжение (5000 в). Чтобы избежать этого, в ответственных местах ставились детали из свинцового стекла и платины, имеющей с этим стеклом одинаковый температурный коэффициент расширения.

Резонатор имел фиксированную частоту, настройка производилась путём изменения магнитного поля, в котором находится источник света. При этом меняется величина зеемановского расщепления, т. е. частота биений.

Высокочастотные колебания, возникающие в резонаторе, через петлю связи, коаксиальную линию, а затем волновод подаются на смеситель, выполненный в виде двойного тройника. За смесителем

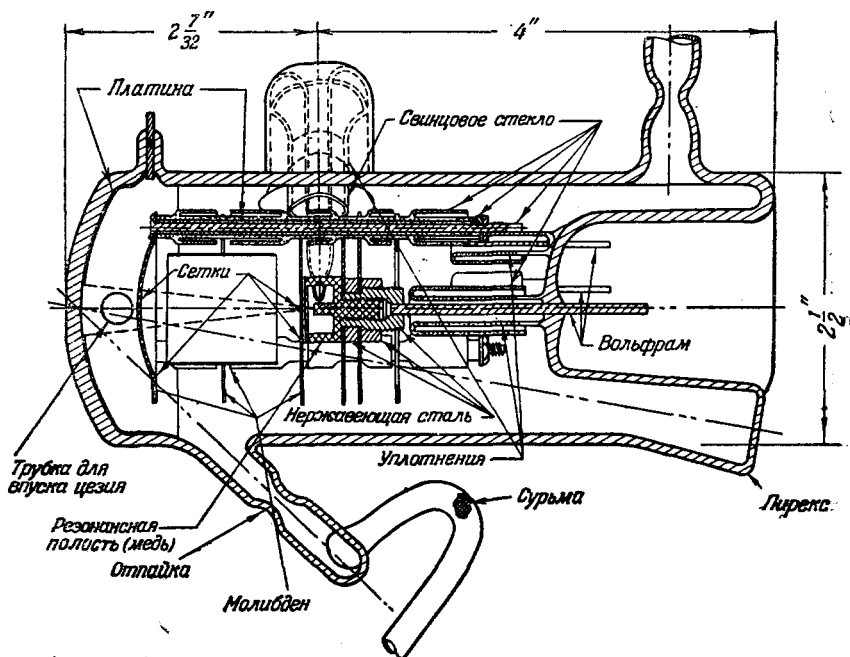


Рис. 6.

следует усилитель на промежуточную частоту 30 Мгц. Полоса усилителя — 7 Мгц. Так как частота гетеродина весьма высока — такого же порядка, как частота биений — возможен её уход на величину, большую чем ширина полосы резонатора. В приборе имеется цепь для контроля частоты гетеродина. Сигнал промежуточной частоты поступает на второй детектор, на выходе которого получается полезный сигнал, замаскированный шумами. Сигнал проходит через узкополосный фильтр на частоте 45 гц и поступает на фазовый детектор, представляющий собой коммутатор, сидящий на одном валу с пластинкой $\lambda/2$. Выпрямленное напряжение через RC-фильтр с постоянной времени 250 сек подаётся на усилитель постоянного тока, а оттуда на прибор. Предусмотрен периодический контроль ухода нуля усилителя постоянного тока.

Описанная аппаратура позволила добиться на выходе прибора отношения сигнала к шуму порядка 2. Результаты измерений изображены на рис. 7.

Здесь ясно виден максимум, соответствующий тому полю, при котором разностная частота F наиболее интенсивных σ -компонент совпадает с собственной частотой резонатора.

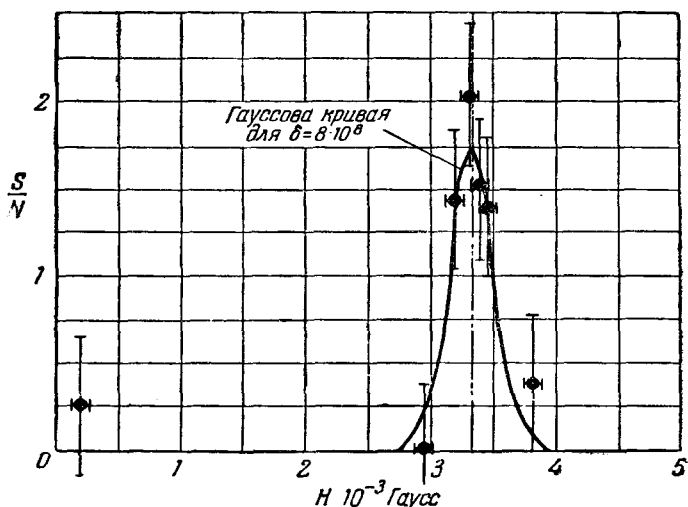


Рис. 7.

Теоретический расчёт установки дал для ожидаемого эффекта величину

$$\frac{S}{N} = 0,83,$$

что вдвое меньше эффекта, полученного на опыте. Такую степень согласия авторы работы считают удовлетворительной, отмечая, вместе с тем, что причиной расхождения может быть неравномерность эмиссии от различных частей фотокатода.

Авторы реферируемой работы считают необходимым подчеркнуть, в заключение, что полученная ими степень согласия между расчётом и экспериментом подтверждает основную идею последнего — идею о том, что фототок пропорционален квадрату мгновенной амплитуды суммарной волны, что означает наличие интерференции между световыми волнами, излучаемыми независимо (различные σ -компоненты излучаются различными атомами). Далее подчёркивается, что если и существует запаздывание между поглощением фотона и вылетом электрона, оно значительно меньше, чем 10^{-10} сек: время релаксации, равное периоду биений, уменьшило бы сигнал в 6,4 раза.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. A. T. Forrester, R. A. Gudmundsen and P. O. Johnson, Phys. Rev. **99**, 1691 (1955).
 2. Г. Горелик, ДАН **43**, 46 (1947).
 3. A. T. Forrester, W. E. Parkins and E. G. Gerjuoy, Phys. Rev. **72**, 728 (1947).
 4. Г. С. Горелик, УФН **34**, 321 (1948).
 5. Г. С. Горелик, Колебания и волны, М. — Л., 1950.
-