

сигнала и генератора накачки), в П. у. обычно используют *объёмные резонаторы*, внутри  $k$ -рых располагают ППД. В генераторах накачки применяют *лавино-пролётный диод*, *Ганна диод*, варакторный умножитель частоты и реже отражат. клистрон. Частота накачки и «холостая» частота выбираются в большинстве случаев близкими к критич. частоте  $f_{кр}$  ППД (т. е. к частоте, на  $k$ -рой П. у. перестаёт усиливать); при этом частота сигнала должна быть значительно меньшей  $f_{кр}$ . Для получения мив. шумовых темп-р (10–20 К и менее) применяют П. у., охлаждаемые до темп-р жидкого азота (77 К), жидкого гелия (4,2 К) или промежуточных (обычно 15–20 К); у неохлаждаемых П. у. шумовая темп-ра 20–500 К и более. Максимально достижимые коэф. усиления и полосы пропускания П. у. определяются в осн. параметрами реактивного элемента. Реализованы П. у. с коэф. усиления мощности принимаемого сигнала, равными 10–30 дБ, и полосами пропускания, составляющими 10–20% несущей частоты сигнала.

П. у. вытесняются транзисторными малощумящими СВЧ-усилителями, как охлаждаемыми, так и неохлаждаемыми, однако продолжают использоваться в миллиметровом диапазоне радиоволн, где они всё ещё превосходят транзисторные усилители.

Лит.: Эткин В. С., Гершензон Е. М., Параметрические системы СВЧ на полупроводниковых диодах, М., 1964; Лопухин В. М., Рощаль А. С. Электронно-лучевые параметрические усилители, М., 1968; СВЧ-полупроводниковые приборы и их применение, пер. с англ., М., 1972; Полупроводниковые параметрические усилители и преобразователи СВЧ, М., 1983.

**ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ РАССЕЯНИЕ** света — неупругое рассеяние света в однородной нелинейной среде, параметры  $k$ -рой (диэлектрич. проницаемость) модулируются световой волной. П. р. характеризуется след. особенностями: а) широким непрерывным спек-

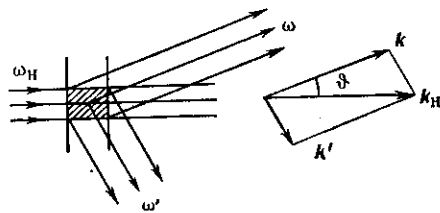
света и параметрич. усилителей. Для спонтанного П. р. используется также терминология, принятая для вынужденных параметрических процессов; падающая волна наз. накачкой (частоты  $\omega_n$ ), а рассеянные волны наз. сигнальной (частоты  $\omega$ , её обычно наблюдают в эксперименте) и холостой (частоты  $\omega'$ , обычно ненаблюдаемая).

Для эффективного П. р. необходимо выполнение условия *фазового синхронизма*:

$$k_n = k + k', \quad (2)$$

здесь  $k_n, k, k'$  — волновые векторы накачки, сигнала и холостой волны в веществе (рис. 2). Так как  $k =$

Рис. 2. Параметрическое рассеяние при распространении света в пьезокристаллах: фотоны распадаются на пары фотонов с меньшими энергиями и частотой, зависящей от направления распространения.



$= \omega/c$ , то определ. соотношения устанавливаются и между показателями преломления среды (чаще кристалла) для частот  $\omega_n, \omega$  и  $\omega'$ . Для выполнения условия фазового синхронизма используют зависимость показателя преломления не только от углов распространения, но и от типа поляризации; напр., если волна накачки необыкновенная, а рассеянные волны обыкновенные, то при фиксиров. угле  $\theta$  между направлением луча накачки и оптич. осью кристалла частота  $\omega$  зависит только от угла рассеяния  $\theta$  (рис. 3).

П. р. можно описать феноменологически с помощью макроско-

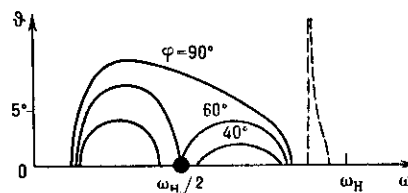


Рис. 3. Связь между частотой рассеянного излучения и направлением его распространения при различных ориентациях кристалла. Штриховые линии относятся к рассеянию на оптических фононах и поляритаонах; кружком отмечен коллинеарный синхронизм при генерации второй гармоники.

пич. ур-ний Максвелла и понятия *нелинейной восприимчивости* среды. Если в среде с квадратичной восприимчивостью  $\chi^{(2)}$  распространяются две волны с частотами  $\omega_n$  и  $\omega'$ , то возникает третья — сигнальная волна с разностной частотой  $\omega = \omega_n - \omega'$ . Её интенсивность в фотонах на моду, т. е. спектральная яркость в единицах  $\hbar\omega^3/8\pi^3c^2 \equiv B_{\omega\Omega}^{(0)}$ , имеет вид:

$$N_k = F_k(N_{k'} + 1). \quad (3)$$

Здесь  $F_k$  — коэф. параметрич. преобразования холостых волн в сигнальные, принимающий макс. значение на поверхности синхронизма. Единица, добавленная к интенсивности  $N_{k'}$  холостой волны, описывает эффект П. р., интенсивность  $k$ -рого в фотонах на моду численно равна, т. о., коэффициенту параметрич. преобразования.

П. р. можно также трактовать как рассеяние падающего света накачки на квантовых флуктуациях холостого поля среды, напр. на поляритаонах. Колебания ионов в решётке кристалла сопровождаются колебаниями эл.-магн. поля внутри кристалла; поляритон — это квант макроскопич. (усреднённого) поля, т. е. фотон в среде, поэтому о П. р. иногда говорят как о «рассеянии света на свете» по аналогии с рассеянием света на звуке (*Мандельштама — Бриллюэна рассеяние*). Однако обычно термин «рассеяние света на свете» отно-

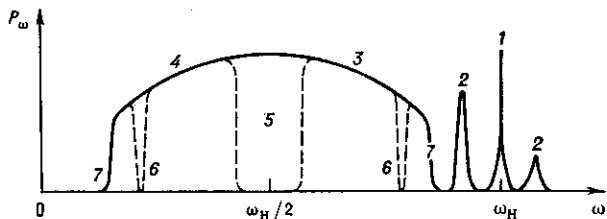


Рис. 1. Примерный вид спектра рассеиваемого пьезокристаллом излучения: 1 — релеевское рассеяние; 2 — комбинационное рассеяние на поляритаонах и оптических фононах; 3 — сигнальное параметрическое рассеяние; 4 — холостое параметрическое рассеяние; 5 — провал в области  $\omega_n/2$  из-за отсутствия синхронизма; 6 — эффект «линеаризации» кристалла из-за прохождения квадратичной нелинейности через нуль при смене знака; 7 — отсутствие синхронизма при уменьшении показателя преломления для холостой волны.

ром рассеянного излучения, не зависящим от собств. частот атомов и молекул (рис. 1); б) зависимостью частоты рассеянного света от угла рассеяния (направления наблюдения); в) рассеянный свет состоит из коррелированных парно фотонов («бифотонов») и является «сжатым», т. е. имеет неодинаковые дисперсии квадратурных амплитуд (см. *Сжатое состояние* света). П. р. наз. также параметрич. люминесценцией, параметрич. преобразованием частоты света и т. п.

П. р. объясняется спонтанным распадом фотонов падающего света на пары фотонов с меньшими энергиями в результате взаимодействия эл.-магн. поля с веществом. Состояние вещества при этом не изменяется (в отличие от большинства др. видов неупругого рассеяния), поэтому выполняется закон сохранения энергии для фотонов:

$$\hbar\omega_n = \hbar\omega + \hbar\omega', \quad (1)$$

где  $\omega_n$  — частота падающего света,  $\omega$  и  $\omega'$  — частоты рассеянного света. Вынужденный процесс типа (1) лежит в основе действия *параметрических генераторов*