

Вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюена (ВРМБ) (Stimulated Brillouin Scattering)

Воронин В.Г., Гладышевский М.А., Наний О.Е., Щербаткин Д.Д.

Вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюена (ВРМБ) представляет собой нелинейный процесс, который может возникать в световодах при мощности излучения много меньшей, чем требуется для вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР). ВРМБ проявляется в виде генерации стоксовой волны, распространяющейся в обратном относительно волны накачки направлении и содержащей значительную часть начальной энергии. Если в процессе ВКР участвует оптический фонон, то в ВРМБ – акустический фонон.

В квантовой механике ВРМБ описывается как уничтожение фотона накачки и одновременное появление стоксова фотона и акустического фонона. Из законов сохранения энергии и импульса следует, что

$$\omega_A = \omega_n - \omega_c \quad (1)$$

$$\vec{k}_A = \vec{k}_n - \vec{k}_c, \quad (2)$$

где ω_n и ω_c - частоты, а \vec{k}_n и \vec{k}_c - волновые векторы волны накачки и стоксовой волны.

Процесс ВРМБ можно описать классически как параметрическое взаимодействие между волнами накачки, стоксовой и акустической.

Благодаря электрострикции, накачка генерирует акустическую волну, приводящую к периодической модуляции показателя преломления. Индуцированная решетка показателя преломления рассеивает излучение накачки в результате брэгговской дифракции.

Фазовый синхронизм при ВРМБ обеспечивается тем, что частота ω_A и волновой вектор \vec{k}_A акустической волны должны удовлетворять дисперсионному соотношению

$$\omega_A = |k_A|v_A = 2v_A|k_n|\sin\frac{\theta}{2}, \quad (3)$$

где θ - угол между направлениями распространения волн накачки и стоксовой волны в приближении $|k_n| \approx |k_c|$.

Из (3) следует, что смещение частоты стоксовой волны зависит от угла рассеяния. В частности, оно максимально для обратного направления ($\theta = \pi$) и исчезает для направления, совпадающего с вектором накачки ($\theta = 0$). Для обратного направления смещение частоты ВРМБ дается выражением

$$v_B = \frac{\omega_A}{2\pi} = \frac{2nV_A}{\lambda_n}, \quad (4)$$

где n - показатель преломления, λ_n - длина волны накачки, V_A - скорость звука.

В одномодовом световоде возможно только обратное направление распространение ВРМБ. Для типичных значений параметров световодов из кварцевого стекла $V_A = 5,96$ км/с, $n = 1,45$, $\lambda_n = 1,55$ мкм частотная отстройка равна $v_B = 11,1$ ГГц.

Для непрерывной накачки и при сильном затухании акустической волны (по сравнению с оптическим сигналом), что имеет место в кварцевых световодах, система уравнений для ВРМБ приводится к виду:

$$\begin{aligned} \left(\frac{d}{dz} + \frac{\alpha}{2} \right) A_n &= \frac{i\omega_n^2}{c^2 2k_n} \epsilon_0 \chi_B^{(3)} |A_c|^2 A_n; \\ \left(\frac{d}{dz} - \frac{\alpha}{2} \right) A_c &= -\frac{i\omega_c^2}{c^2 2k_c} \epsilon_0 \chi_B^{(3)} |A_n|^2 A_c, \end{aligned} \quad (5)$$

где A_n , A_c - медленно меняющиеся амплитуды оптических полей накачки и стоксовой волн, α - коэффициент потерь, $\chi_B^{(3)}$ - бриллюэновская восприимчивость. За ВРМБ ответственна резонансная часть $\chi_B^{(3)}$, которая является положительной чисто мнимой величиной.

Разные знаки в первом и втором уравнениях соответствуют встречному направлению распространения волны накачки и стоксовой волны.

В приближении неистощимости непрерывной накачки, переходя от амплитуд к мощности сигнала, из (5) можно получить, что стоксова волна, распространяясь навстречу накачке, экспоненциально усиливается в соответствии с равенством:

$$P_c(0) = P_c(L) \exp \left[g_B(v) P_0 \frac{L_{\text{эфф}}}{A_{\text{эфф}}} - \alpha L \right], \quad (6)$$

где P_0 - мощность накачки, $P_c(0)$ - мощность стоксовой волны при $Z=0$, $P_c(L)$ - мощность стоксовой волны при $Z=L$, $A_{\text{эфф}}$ - эффективная площадь сечения одномодового световода, $L_{\text{эфф}}$ - эффективная длина взаимодействия, $g_B(v)$ - коэффициент усиления ВРМБ.

Усиление происходит при условии $P_0 \geq \frac{\alpha L A_{\text{эфф}}}{g_B(v) L_{\text{эфф}}}.$

График зависимости коэффициента усиления ВРМБ слабого сигнала $g_B(v)$ от частотной отстройки приведен на рис.1.

Максимальный коэффициент усиления при $v = v_B$ (4)дается выражением:

$$g_B(v) = \frac{\omega_c^2}{\epsilon_0 c^3 |k_c|} \operatorname{Im} \chi_B^{(3)} = \frac{2\pi n^7 p_{12}^2}{c \lambda_n^2 \rho_0 V_A \Delta v_B}, \quad (7)$$

где p_{12} - продольный акустооптический коэффициент, ρ_0 - плотность материала, Δv_B - ширина спектра ВРМБ - усиления, Δv_B обратно пропорциональна λ_n^2 . В результате, как следует из (7) коэффициент ВРМБ - усиления не зависит от длины волны накачки. Для типичных значений параметров плавленого кварца из (7) получим $g_B \approx 5 \cdot 10^{-11} \text{ м/вт}$. Это почти на три порядка больше коэффициента усиления на $\lambda_n = 1.55 \text{ мкм}$ для ВКР.

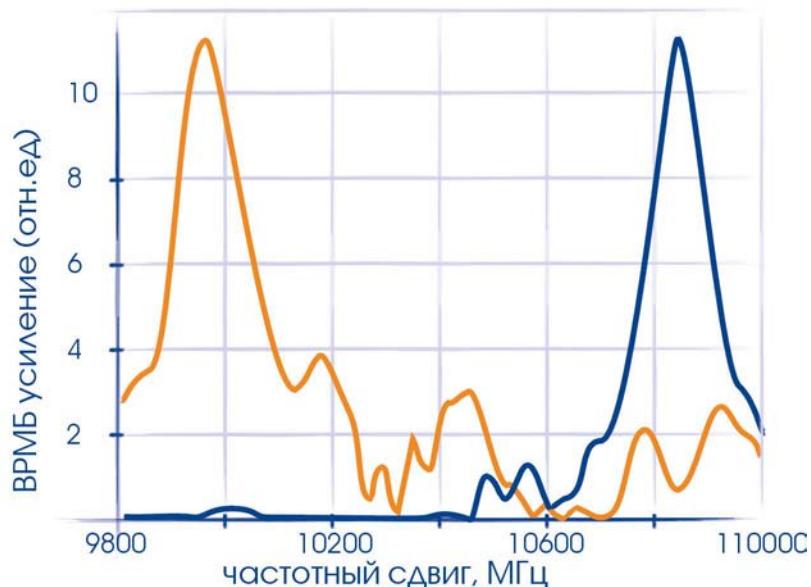


Рис.1. Графики зависимости коэффициента усиления ВРМБ слабого сигнала $g_B(v)$ в стандартном и фосфорном волокне от частотной отстройки. Длина волны накачки 1,5 мкм.

Уравнение (6) определяет усиление стоксова сигнала, возникающего в точке $Z = L$, благодаря ВРМБ. На практике такой сигнал обычно отсутствует (если только световод не используется как ВРМБ – усилитель) и стоксова волна возникает из шумов спонтанного МБ – рассеяния. Порог ВРМБ достигается при критической мощности непрерывной накачки P_0^{kp} , удовлетворяющей соотношению

$$g_B \cdot P_0^{kp} \cdot \frac{L_{\text{эфф}}}{A_{\text{эфф}}} \approx 21 , \quad (8)$$

где g_B – пиковое значение ВРМБ – усиления, определяемое формулой (7). Величина критической мощности P_0^{kp} может возрастать в 1-2 раза в зависимости от того, сохраняют ли стоксова волна и волна накачки поляризацию в световоде.

Оценка для $\lambda_h = 1.55\text{мкм}$, $A_{\text{эфф}} = 50\text{мкм}^2$, $L_{\text{эфф}} \approx 20\text{км}$, $g_B = 5 \cdot 10^{-11} \text{м/вт}$ дает величину $P_0^{kp} = 1\text{мвт}$. Это соответствует плотности мощности $2 \cdot 10^3 \text{ вт/см}^2$ и полю 10^3 в/см . Для сравнения, внутриатомное поле, удерживающее электроны вблизи ядра, $\sim 3 \cdot 10^8 \text{ в/см}$. Такой низкий порог делает ВРМБ доминирующим нелинейным процессом в световодах при непрерывной накачке.

Однако в отличие от ВКР, спектральная ширина ВРМБ–усиления $\Delta\nu_B$ очень мала ($\approx 10 \div 100$ МГц против 5 Гц). Ширина спектра $\Delta\nu_B$ связана со временем затухания акустической волны или временем жизни фонона T_B . Если принять затухание акустической волны экспоненциальным $\exp(-t/T_B)$, то $\Delta\nu_B = 1/T_0 \pi$.

Сопоставление коэффициентов усиления и времени жизни оптического (при ВКР) и акустического (при ВРМБ) фононов показывает, что большей инерционности процесса соответствует большая величина коэффициента усиления.

Если спектр накачки имеет лоренцев профиль с шириной на полувысоте $\Delta\nu_H$, то пиковое ВРМБ – усиление дается выражением

$$g_B = \frac{\Delta\nu_B}{\Delta\nu_B + \Delta\nu_H} g_B(\nu_B), \quad (9)$$

где $g_B(\nu_B)$ следует из (9.8.7),

$\Delta\nu_B$ – ширина спектра ВРМБ – усиления на полувысоте.

Таким образом, в случае импульсной накачки при длительности импульса T_0 меньше 1 нс ВРМБ – усиление понижается. Если $\Delta\nu_H \gg \Delta\nu_B$, то на основании формулы (9) ВРМБ – усиление уменьшается в $\Delta\nu_H / \Delta\nu_B$ раз.

Если поместить световод в резонатор, то ВРМБ можно использовать в волоконных ВРМБ – лазерах. Благодаря обратной связи пороговая мощность накачки лазера существенно ниже того, что дает выражение (8).

ВРМБ – усиление в световодах можно использовать для усиления слабых сигналов, частота которых смешена от частоты накачки на величину ВРМБ сдвига ν_B . Однако полоса пропускания ВРМБ – усиления $\Delta\nu_B \leq 100$ мгц, в то время как у ВКР – усилителей она составляет примерно 5 Гц.

В системах оптической связи можно увеличить расстояние между ретрансляторами, если непрерывную накачку вводить в световод навстречу сигналу.



ВРМБ имеет и негативную роль в системах оптической связи. А именно, если мощность излучения в световоде превышает порог ВРМБ, то заметная часть мощности преобразуется в стоксово излучение, распространяющееся в обратном направлении. В результате истощения накачки, во-первых, мощность сигнала на приемнике оказывается существенно меньше, чем в отсутствие ВРМБ, а во-вторых, порождается мощный сигнал, направленный обратно к передатчику, вызывая необходимость защиты его изолятором.

В случае многоканальной системы со спектральным уплотнением мощность в каждом канале должна быть ниже порога ВРМБ. В противном случае в системе могут возникнуть перекрестные помехи.

Т. к. полоса усиления ВРМБ невелика, то влияние ВРМБ в системах оптической связи может быть уменьшено путем увеличения ширины линии источника (см. (9)), например, с помощью модуляции излучения лазера. В системах с амплитудной модуляцией, использующих внешний модулятор с узкой шириной линии источника, независимо от битовой скорости, порог ВРМБ возрастает, но не более чем в 2-4 раза, так как значительная часть мощности таких систем все еще содержится в оптической несущей.

Использование схем фазовой модуляции существенно уменьшает ВРМБ-усиление. В этом случае ширина линии источника пропорциональна битовой скорости, что приводит с возрастанием скорости передачи информации к почти линейному возрастанию порога ВРМБ.