

COMUNICACIONES OPTICAS

FENOMENOS NO LINEALES

Universidad Autónoma de Baja California UABC
FACULTAD DE INGENIERIA ENSENADA
Dr. Horacio Luis Martínez Reyes

FENOMENOS NO LINEALES EN FIBRAS OPTICAS

Se producen efectos no lineales en los dieléctricos cuando se tienen potencias ópticas suficientemente grandes (campos electromagnéticos muy intensos) propagándose por ellos.

El SiO_2 (sílice) es un material con baja no linealidad. Sin embargo, con la aparición de los amplificadores ópticos, que introducen fuertes potencias luminosas en los pequeños núcleos de las fibras, y la utilización del multiplexado en longitud de onda (WDM), los efectos no lineales en fibras ópticas son cada vez mas importantes.

FENOMENOS BASICOS

SCATTERING NO LINEAL: la potencia óptica se difunde (se pierde) al interaccionar con el medio, pero a longitudes de onda diferentes de la que origino dicha difusión.

EFFECTO KERR: El índice de refracción es dependiente de la potencia óptica que se propaga por el y hay que tener en cuenta un termino (en primera aproximación) proporcional a la intensidad del campo ($n = n_0 + n_1 * I$). Esto da lugar a modulación de fase de la señal que podría ser catastrófica en sistemas WDM con varias portadoras.

SCATTERING NO LINEAL:

Se pueden compensar las pérdidas en una fibra óptica inyectando suficiente potencia, sin embargo, pueden aparecer fenómenos dispersivos.

Estos fenómenos de 'scattering' no lineal producen un cambio de potencia del modo guiado a campo difundido, provocando perdidas adicionales, en lugar de obtener una ganancia en la fibra óptica.

la difusión de energía se produce porque parte de la potencia óptica se transmite a la red de moléculas del material, modificando el estado de vibración de dichas moléculas.

Desde el punto de vista cuántico, significa que si parte de la energía de un fotón se transmite a la red (a través de un fonón) el fotón difundido va a tener una energía menor (longitud de onda mayor).

En estos efectos, la longitud de onda de la potencia difundida es de mayor longitud de onda que la incidente y a bajas potencias de trabajo son despreciables.

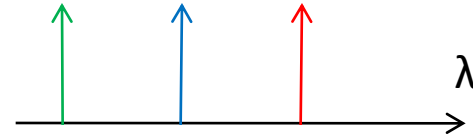
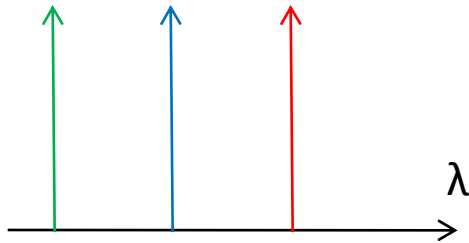
EFFECTOS DE SCATTERING NO LINEAL:

Difusión de Brillouin estimulada (SBS: Stimulated Brillouin Scattering)

Difusión de Raman estimulada (SRS: Stimulated Raman Scattering)

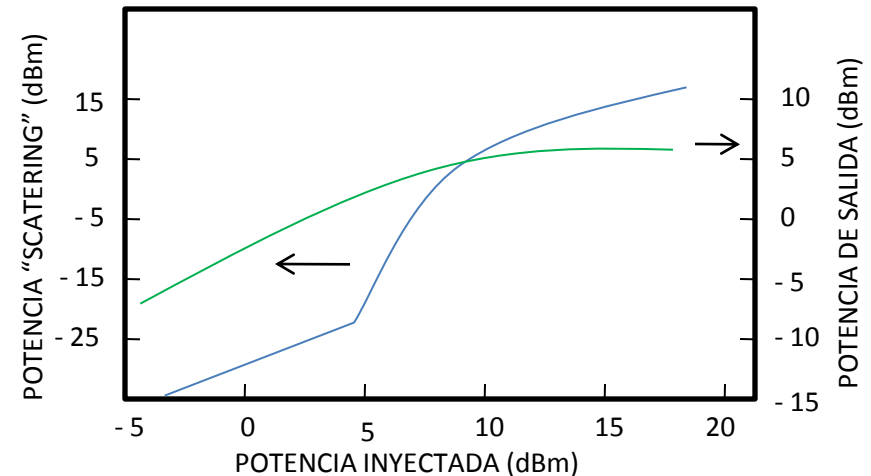
La diferencia entre ambas estriba en el alcance de la interacción con la red

STIMULATED BRILLOUIN SCATTERING (SBS): Ocurre cuando se genera una onda acústica debido a un fuerte campo eléctrico (alta densidad de potencia) en la fibra. La onda acústica interactúa con la onda óptica generando una nueva onda óptica. En fibras monomodo la primera onda óptica va en dirección propagante, y la segunda onda óptica en dirección anti propagante. La onda en dirección propagante original pierde potencia por la onda anti propagante (de difusión).



SBS es un efecto de interacción del campo electromagnético con vibraciones acústicas de la red. Esto significa que la energía aportada a la red por cada fotón es muy pequeña, y la longitud de onda de luz difundida está muy cercana a la que la origina: típicamente 20 GHz. También, significa que el ancho de banda de la interacción es pequeñísimo (~ 20 MHz). La potencia umbral puede ser del orden de 1 mW a $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$.

Afortunadamente, $\Delta\nu_{\text{fuente}}$ es mucho mayor de 20 MHz.



SBS es el mayor efecto no lineal en las fibras

STIMULATED RAMAN SCATTERING (SRS): Dos ondas ópticas interactúan a través de una onda vibracional en dirección propagante de la fibra. Las ondas son una bomba y una señal pero pueden ser dos canales de WDM.



SRS es un efecto de interacción del campo electromagnético con vibraciones moleculares de la red. Al contrario del SBS, el ancho de banda de interacción es enorme (del orden de 100 nm) y un máximo de interacción situado sobre 40-80 nm de la longitud de onda que lo generó.

La potencia umbral de SRS puede estar en el orden de varios centenares de mW, por lo que generalmente no afecta a sistemas de comunicaciones ópticas con una única longitud de onda. En sistemas con varias longitudes de onda puede llegar a limitar debido a mezclas de canales

EFEECTO KERR

El efecto kerr también se denomina efecto de no linealidad del índice, y aparece como consecuencia de los intensos campos electromagnéticos que se pueden propagar por una fibra óptica. Para un dieléctrico, se tiene que:

$$n = n_0 + n_1 I + \frac{1}{2} n_2 I^2 + \dots$$

n_1 , n_2 , ... generalmente son valores muy pequeños y se desprecian para valores normales de potencia, donde el índice es independiente de la potencia óptica. Cuando los valores de potencia son grandes se puede emplear solamente el primer termino del desarrollo, así:

$$n = n_0 + n_1 \frac{P}{A_{eff}}$$

El termino n_1 provoca un cambio en la fase de la onda a través del termino en $e^{-\beta z}$, que no tendría mayor importancia si la potencia no fuese función del tiempo, ya que daría un termino constante de fase. Al ser la potencia una función del tiempo (se modula la potencia), la fase también varia con el tiempo dando lugar a un efecto de chirp.

Los efectos relacionados con el efecto Kerr son:

- * Automodulación de fase (SPM)
- * Modulación cruzada de fase (XPM) (solo en WDM)
- * Mezclado de cuatro frecuencias (FWM) (solo en WDM)

SELF PHASE MODULATION (SPM): el índice de refracción n es no lineal.

$$n = n_0 + n_1 \left(\frac{P}{A_{eff}} \right)$$

$n_1 = 3.2 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$ (para fibra de silicio)

P es la potencia óptica

A_{eff} es área transversal del modo

Aunque la porción no lineal del índice es muy pequeña, los efectos de n_1 pueden afectar seriamente a los sistemas de alta velocidad y de gran distancia. Debido a esta no linealidad los cambios en intensidad de potencia y los cambios del índice refractivo causan que las diferentes intensidades se propaguen a diferentes velocidades en la fibra. Las fluctuaciones en potencia se convierten en fluctuaciones de fase. Se tiene anchura temporal y espectral.

El efecto Kerr se traslada a las fibras a través de β : $\beta_{SPM} = \beta + \gamma P$ donde $\gamma = \frac{k_0 n_1}{A_{eff}}$

La diferencia de fase generada en una distancia L es:

$$\phi_{SPM} = \int_0^L (\beta_{SPM} - \beta) dz = \int_0^L \gamma P(z) dz = \gamma P_{in} L_{eff}$$

P_{in} depende del tiempo, lo que dará lugar a un fenómeno de chirp, lo que es equivalente, a un ensanchamiento espectral del pulso. Este ensanchamiento espectral afectará al pulso a través de la dispersión cromática. Para minimizar este efecto hay que conseguir que $\phi_{SPM} \ll 1$, por lo que:

$$P_{in} \ll \frac{1}{\gamma L_{eff}} = \frac{\alpha}{\gamma}$$

$$\gamma = 2W^{-1} \text{ km}^{-1}$$

$$\alpha \approx 0.2 \text{ dB km}^{-1}$$

$$P_{in} \ll 22 \text{ mW}$$

Un aspecto positivo del SPM es que el chirp que introduce es de signo opuesto al que se genera por la dispersión cromática, por lo que se puede pensar en compensar dicha dispersión a partir de una cierta no linealidad: esto es lo que se hace con los solitones.

CROSS-PHASE MODULATION XPM (MODULACION CRUZADA DE FASE): La potencia óptica de pulsos de datos en un canal afecta el índice refractivo, la velocidad de propagación, y la dispersión/distorsión de pulsos de datos en otro canal, dando lugar a interferencia entre canales. Es importante en WDM.

$$\frac{dA_1}{dz} = i\gamma_1 \left[|A_1|^2 + 2|A_2|^2 + \dots + 2|A_n|^2 \right] A_1$$

A_1 es el campo óptico de propagación

γ_1 es el coeficiente no lineal

La modulación de fase cruzada (XPM) se produce entre diferentes canales de un sistema WDM, de forma que la potencia de un canal puede afectar a la fase de otro canal, provocando efectos de ensanchamiento de pulsos cruzados. Es importante para sistemas WDM con mas de 10 canales.

Efecto de SPM y XPM



FOUR WAVE MIXING (FWM): Es la mezcla de dos ondas generando nuevas ondas a las frecuencias de suma y diferencia.

FWM ocurre solo cuando dos canales se localizan cerca de la longitud de onda (λ) de la dispersión cero debido a que las dos ondas deben mantener ciertos requerimientos de acoplamiento de fase.

Efectos:

Menor. El canal original sufre pérdidas de potencia por la transferencia de potencia a los nuevos productos generados.

Mayor. Cuando hay más de tres canales en WDM produciendo muchos productos de mezclado y puede crear diafonía (crosstalk).



FWM es el fenómeno limitante en los sistemas WDM.

REDUCCION DE FENOMENOS NO LINEALES

SRS. se pueden atenuar a los canales de λ mayor para compensar la ganancia (pre-enfasis)

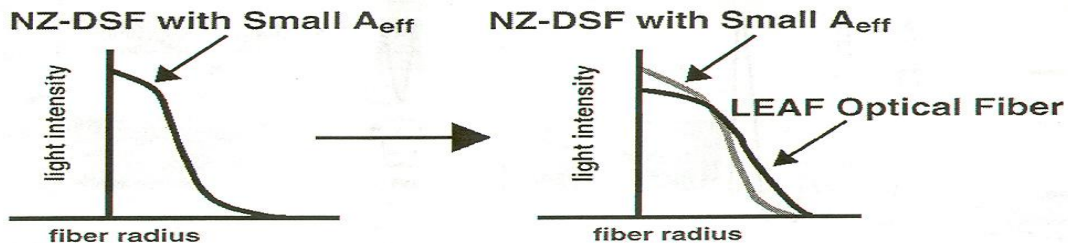
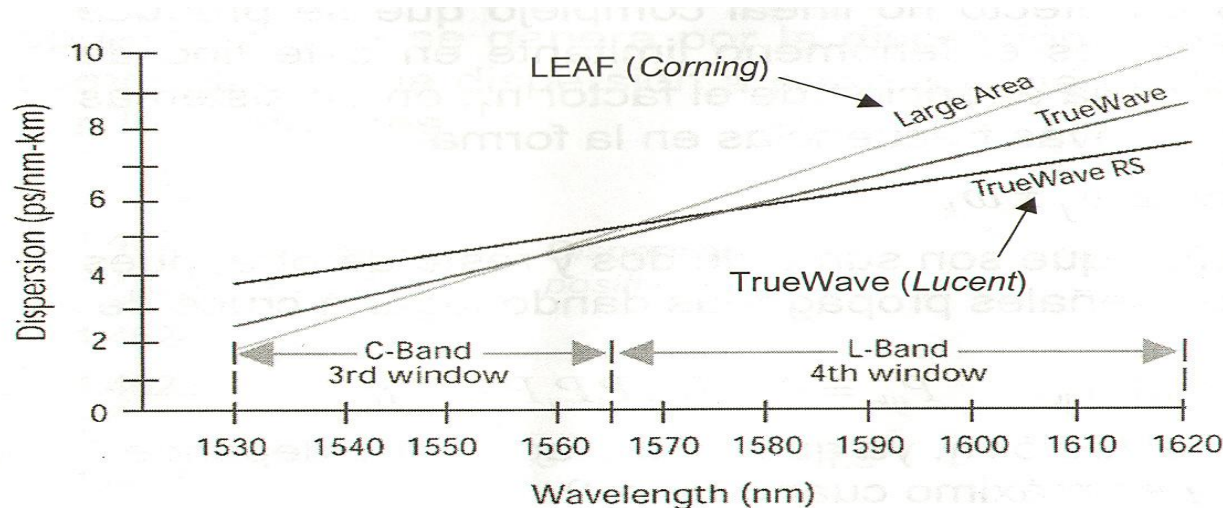
XPM y FWM. Se pueden reducir utilizando dos tipos de fibra corta entre el enlace con la misma dispersión y diferente signo para la longitud de onda. La longitud de onda con dispersión cero se modifica.

FWM. Se puede reducir generando productos de longitud de onda diferentes a las señales originales.

FWM y SBS. Se pueden reducir incrementando el espaciamiento entre canales.
Espaciamientos de alrededor a 100 GHz hará despreciable a FWM
Espaciamiento de alrededor a 1 GHz inhibe SBS

FIBRAS ESPECIALES PARA EVITAR FENOMENOS NO LINEALES

Existen un tipo de fibras ópticas llamadas fibras de dispersión desplazada no cero (NZDF) que han sustituido a las fibras de dispersión desplazada normales, debido a que estas presentan fuertes problemas de FWM en el punto de dispersión cero. Con este tipo de fibras la dispersión es pequeña para que no se acumule demasiado, pero es suficiente para disminuir los problemas de FWM. La fibra LEAF presenta, además, una anchura efectiva mas grande de lo normal, lo que reduce el parámetro no lineal γ .



COMPROMISO ENTRE DISPERSION Y NO LINEALIDAD

Debe existir un compromiso entre dispersión cromática en tercera ventana y fenómenos no lineales en sistemas WDM (básicamente, el FWM) de forma que haya algo de dispersión cromática para minimizar estos efectos, pero no tanta como para que los sistemas no puedan operar por ensanchamiento de los pulsos.

