

# Simulación de Peines de Frecuencia Óptica Generados por Láseres de Semiconductor

*Autor:*

Jaime Díez González-Pardo

*Director:*

Ángel Valle



24 de septiembre de 2019

# Láser de Semiconductor

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

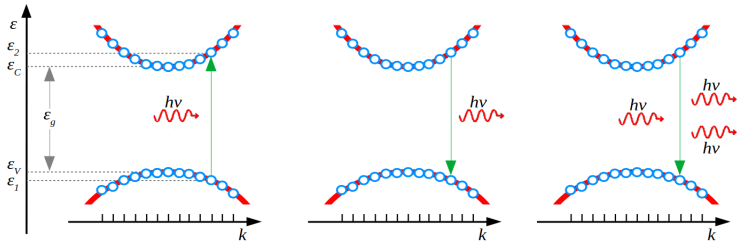
Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones



# Láser de Semiconductor

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

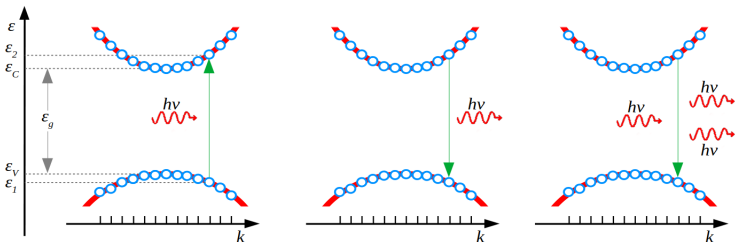
Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones



Láser de Semiconductor:

- Emisión Lateral

# Láser de Semiconductor

Jaime Díez

Láser de Semiconductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución estocástica

Dinámica No Lineal

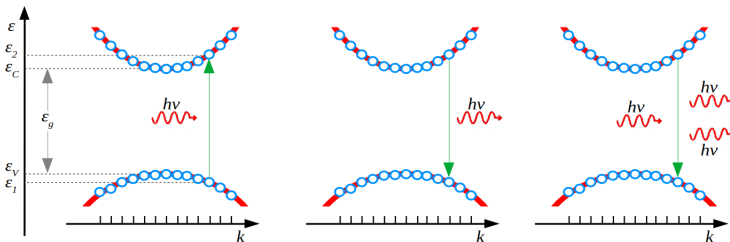
Láser en Solitario

Encendido por Ganancia

Inyección de Luz

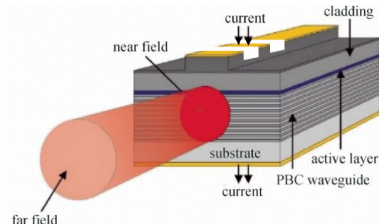
G-S con IO

Conclusiones



Láser de Semiconductor:

- Emisión Lateral



# Láser de Semiconductor

Jaime Díez

Láser de Semiconductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución estocástica

Dinámica No Lineal

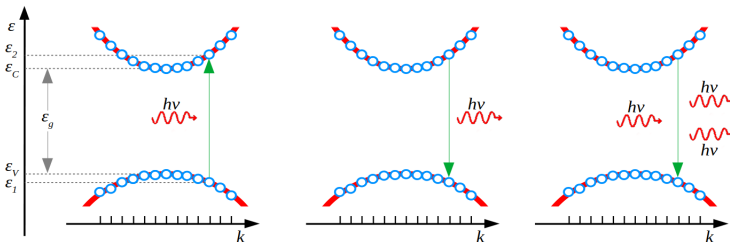
Láser en Solitario

Encendido por Ganancia

Inyección de Luz

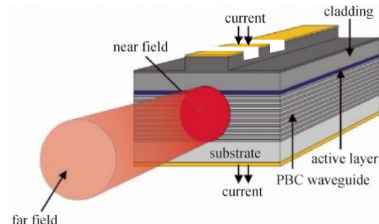
G-S con IO

Conclusiones



Láser de Semiconductor:

- Emisión Lateral
- Modo discreto (DML)



# Peines de Frecuencia Óptica OFC

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

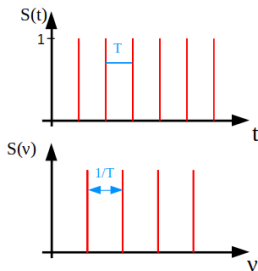
Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones



$$P(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} |\mathcal{F}(x)(\omega)|^2$$

# Peines de Frecuencia Óptica OFC

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

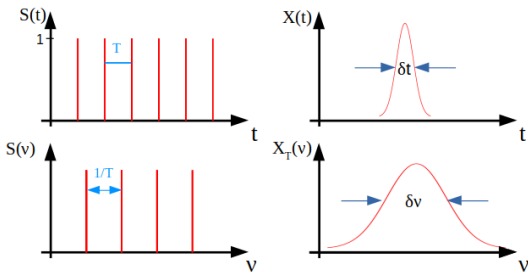
Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones



$$P(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} |\mathcal{F}(x)(\omega)|^2 \quad \delta\nu\delta t = \text{Cte}$$

# Peines de Frecuencia Óptica OFC

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

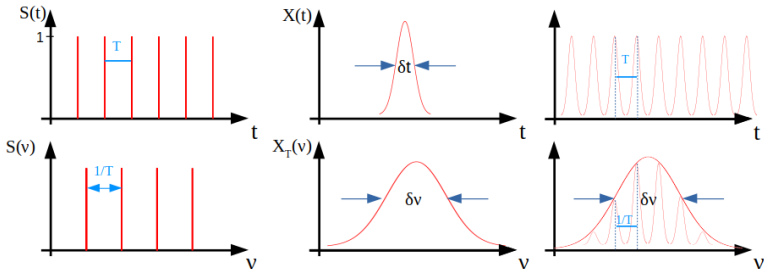
Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones



$$P(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} |\mathcal{F}(x)(\omega)|^2$$

$$\delta\nu\delta t = \text{Cte}$$

$$x(t) = X_T(t) * S(t)$$

$$\chi(\nu) = \chi_T(\nu) \cdot S(\nu)$$



# Métodos de Generación de OFC

## Encendido por Ganacia (**Gain-Switching**):

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

**OFC**

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinamica No  
Lineal

Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones

# Métodos de Generación de OFC

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinamica No  
Lineal

Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones

## Encendido por Ganacia (**Gain-Switching**):

- Se alcanza rápidamente un alto valor para la ganancia del láser

# Métodos de Generación de OFC

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinamica No  
Lineal

Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones

## Encendido por Ganacia (**Gain-Switching**):

- Se alcanza rápidamente un alto valor para la ganancia del láser
- Pulsos del láser de corta duración y grandes picos de potencia

# Métodos de Generación de OFC

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinamica No  
Lineal

Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones

## Encendido por Ganacia (**Gain-Switching**):

- Se alcanza rápidamente un alto valor para la ganancia del láser
- Pulsos del láser de corta duración y grandes picos de potencia

## Inyección Óptica:

# Métodos de Generación de OFC

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones

## Encendido por Ganancia (**Gain-Switching**):

- Se alcanza rápidamente un alto valor para la ganancia del láser
- Pulsos del láser de corta duración y grandes picos de potencia

## Inyección Óptica:

- Inyectar fotones provenientes de un segundo láser

# Métodos de Generación de OFC

## Encendido por Ganancia (**Gain-Switching**):

- Se alcanza rápidamente un alto valor para la ganancia del láser
- Pulsos del láser de corta duración y grandes picos de potencia

## Inyección Óptica:

- Inyectar fotones provenientes de un segundo láser
- las características de la fase del láser inyectado pasan a estar determinadas por la inyección

# Métodos de Generación de OFC

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinamica No  
Lineal

Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones

## Encendido por Ganancia (**Gain-Switching**):

- Se alcanza rápidamente un alto valor para la ganancia del láser
- Pulsos del láser de corta duración y grandes picos de potencia

## Inyección Óptica:

- Inyectar fotones provenientes de un segundo láser
- las características de la fase del láser inyectado pasan a estar determinadas por la inyección
- Bloqueo por inyección

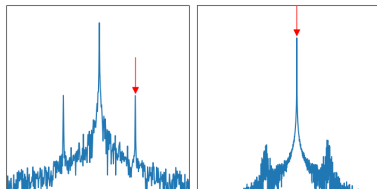
# Métodos de Generación de OFC

## Encendido por Ganancia (**Gain-Switching**):

- Se alcanza rápidamente un alto valor para la ganancia del láser
- Pulsos del láser de corta duración y grandes picos de potencia

## Inyección Óptica:

- Inyectar fotones provenientes de un segundo láser
- las características de la fase del láser inyectado pasan a estar determinadas por la inyección
- Bloqueo por inyección





# Ecuaciones de Balance

Densidad de Portadores:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I(t)}{eV_{act}} - R(N) - \frac{v_g g(N) S(t)}{1 + \epsilon S(t)}$$

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

**Ec. de Balance**

Resolución  
estocástica

Dinamica No  
Lineal

Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones

# Ecuaciones de Balance

Densidad de Portadores:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I(t)}{eV_{act}} - R(N) - \frac{v_g g(N) S(t)}{1 + \epsilon S(t)}$$

Densidad de Fotones:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} = & \left[ \frac{\Gamma v_g g(N)}{1 + \epsilon S(t)} - \frac{1}{\tau_p} \right] S(t) + \beta \Gamma B N^2(t) \\ & + \sqrt{2\beta \Gamma B N^2(t) S(t)} F_S(t) + Y_S(t) \end{aligned}$$

# Ecuaciones de Balance

Densidad de Portadores:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I(t)}{eV_{act}} - R(N) - \frac{v_g g(N) S(t)}{1 + \epsilon S(t)}$$

Densidad de Fotones:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} = & \left[ \frac{\Gamma v_g g(N)}{1 + \epsilon S(t)} - \frac{1}{\tau_p} \right] S(t) + \beta \Gamma B N^2(t) \\ & + \sqrt{2\beta \Gamma B N^2(t) S(t)} F_S(t) + Y_S(t) \end{aligned}$$

Fase Óptica:

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi}{dt} = & \frac{\alpha}{2} \left[ \Gamma v_g g(N) - \frac{1}{\tau_p} \right] + 2\pi \Delta\nu(I) \\ & + \sqrt{\frac{\beta \Gamma B N^2(t)}{2S(t)}} F_\Phi(t) + Y_\Phi(t) \end{aligned}$$

# Resolución de EDS

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

**Resolución  
estocástica**

Dinamica No  
Lineal

Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones

- Las EDS vienen definidas por la ecuación de Langevin

# Resolución de EDS

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

**Resolución  
estocástica**

Dinamica No  
Lineal

Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones

- Las EDS vienen definidas por la ecuación de Langevin

$$\frac{dx}{dt} = a(x, t) + b(x, t)F(t)$$

# Resolución de EDS

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

**Resolución  
estocástica**

Dinamica No  
Lineal

Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones

- Las EDS vienen definidas por la ecuación de Langevin

$$\frac{dx}{dt} = a(x, t) + b(x, t)F(t)$$

$$x(t + \Delta t) = x(t) + a(x, t)\Delta t + \eta(t)\sqrt{\Delta t}$$

# Resolución de EDS

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

**Resolución  
estocástica**

Dinamica No  
Lineal

Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones

- Las EDS vienen definidas por la ecuación de Langevin

$$\frac{dx}{dt} = a(x, t) + b(x, t)F(t)$$

$$x(t + \Delta t) = x(t) + a(x, t)\Delta t + \eta(t)\sqrt{\Delta t}$$

- $\eta(t)$  es de tipo gaussiano con  $\eta = \sqrt{V[\eta]}Z + E[\eta] = bZ$ .

# Resolución de EDS

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

**Resolución  
estocástica**

Dinámica No  
Lineal

Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones

- Las EDS vienen definidas por la ecuación de Langevin

$$\frac{dx}{dt} = a(x, t) + b(x, t)F(t)$$

$$x(t + \Delta t) = x(t) + a(x, t)\Delta t + \eta(t)\sqrt{\Delta t}$$

- $\eta(t)$  es de tipo gaussiano con  $\eta = \sqrt{V[\eta]}Z + E[\eta] = bZ$ .

$$x_{i+1} = x_i + a(x_i, t_i)\Delta t + b(x_i, t_i)Z_i\sqrt{\Delta t}$$



# Dinámica no lineal

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

**Dinámica No  
Lineal**

Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones

- Comportamiento aleatorio y errático, **Caos Determinista**

# Dinámica no lineal

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinamica No  
Lineal

Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones

- Comportamiento aleatorio y errático, **Caos Determinista**
- Se caracterian por la *divergencia de trayectorias cercanas*

# Dinámica no lineal

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones

- Comportamiento aleatorio y errático, **Caos Determinista**
- Se caracterian por la *divergencia de trayectorias cercanas*
- En los sistemas disipativos las trayectorias tienden al atractor

# Dinámica no lineal

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

Láser en  
Solitario

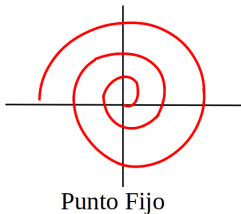
Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones

- Comportamiento aleatorio y errático, **Caos Determinista**
- Se caracterian por la *divergencia de trayectorias cercanas*
- En los sistemas disipativos las trayectorias tienden al atractor



# Dinámica no lineal

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

Láser en  
Solitario

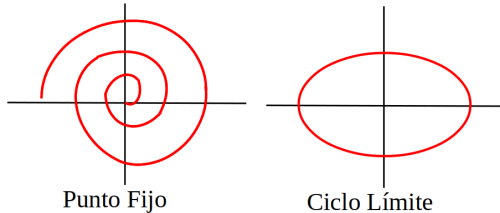
Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones

- Comportamiento aleatorio y errático, **Caos Determinista**
- Se caracterian por la *divergencia de trayectorias cercanas*
- En los sistemas disipativos las trayectorias tienden al atractor



# Dinámica no lineal

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

Láser en  
Solitario

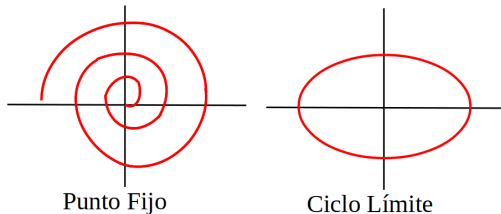
Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones

- Comportamiento aleatorio y errático, **Caos Determinista**
- Se caracterian por la *divergencia de trayectorias cercanas*
- En los sistemas disipativos las trayectorias tienden al atractor



- Una bifurcación es el cambio en la solución debido al cambio en los parámetros

# Espectros de Emisión en CW

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

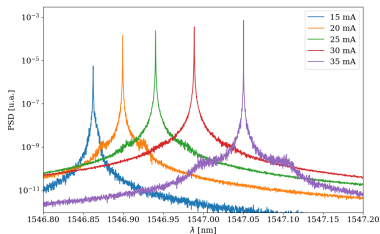
Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones



# Espectros de Emisión en CW

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

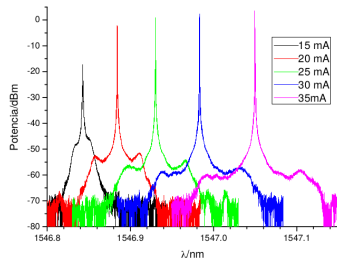
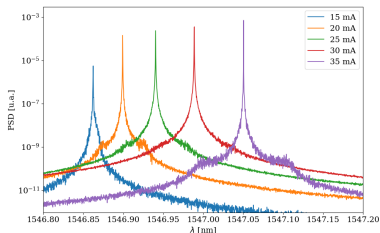
Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones





# Espectros de Emisión en CW

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

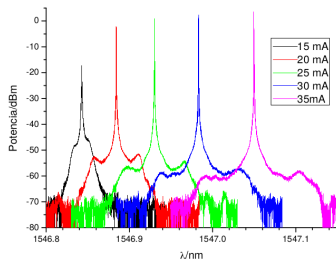
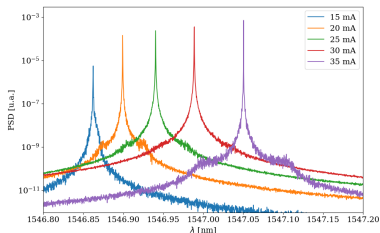
Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones



$$\lambda_0 = \frac{2nL}{q}$$

# Espectros de Emisión en CW

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

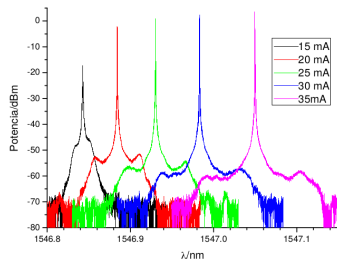
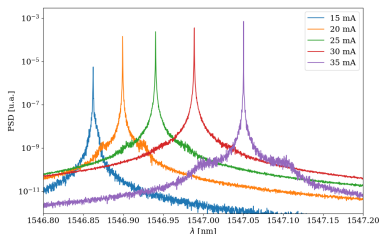
Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones



$$\lambda_0 = \frac{2nL}{q}$$

$I_{bias}$ [mA]	$\lambda_{sim}$ [nm]	$\lambda_{exp}$ [nm]
15	1546.86	1546.84
20	1546.90	1546.88
25	1546.94	1546.93
30	1546.99	1546.98
35	1547.05	1547.05

# G-S a Altas Frecuencias $f_R = 5,0$ GHz

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

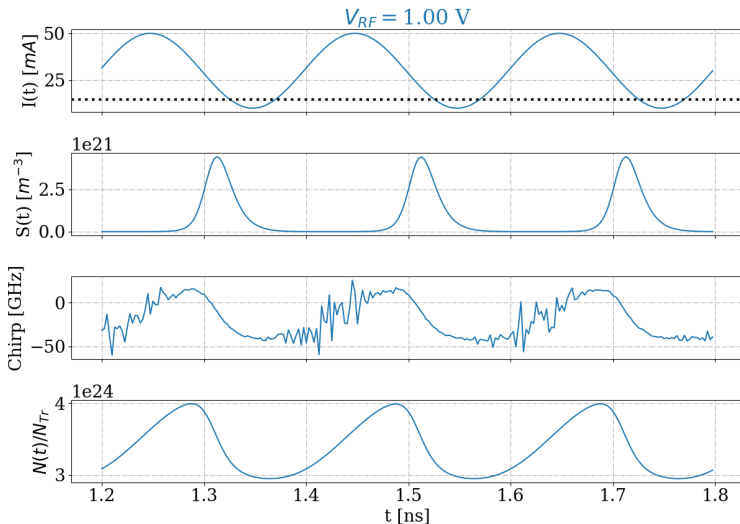
Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones



# G-S a Altas Frecuencias $f_R = 5,0$ GHz

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

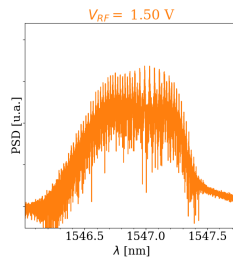
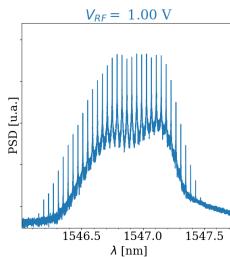
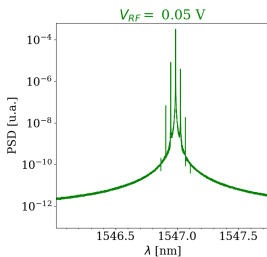
Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones



# G-S a Altas Frecuencias $f_R = 5,0$ GHz

Jaime Díez

Láser de  
Semiconductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

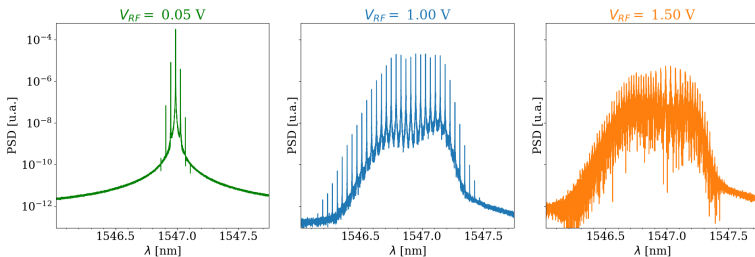
Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones



Se observa la creación y destrucción de los peines a medida que se aumenta la amplitud

# G-S a Bajas Frecuencias $f_R = 500$ MHz

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinamica No  
Lineal

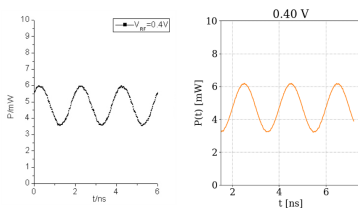
Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones



# G-S a Bajas Frecuencias $f_R = 500$ MHz

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

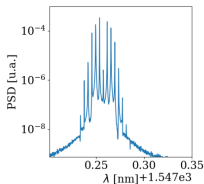
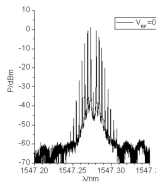
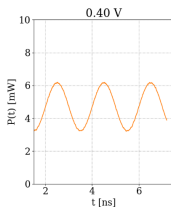
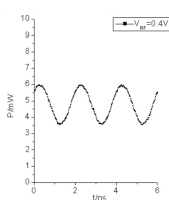
Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones



# G-S a Bajas Frecuencias $f_R = 500$ MHz

Jaime Díez

Láser de  
Semiconductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

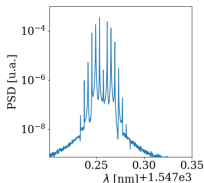
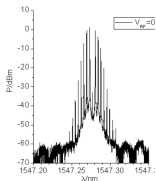
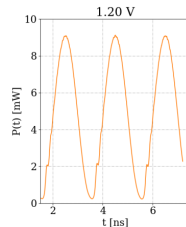
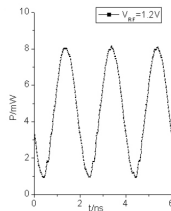
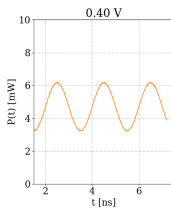
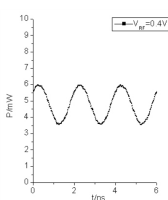
Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones





# G-S a Bajas Frecuencias $f_R = 500$ MHz

Jaime Díez

Láser de  
Semiconductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

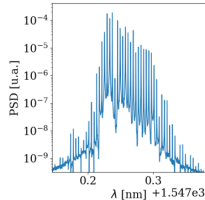
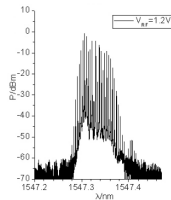
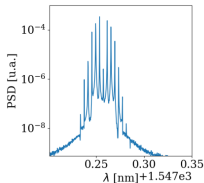
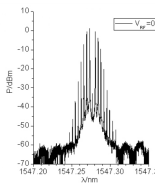
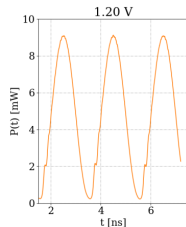
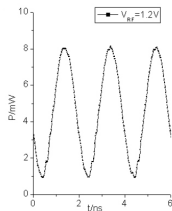
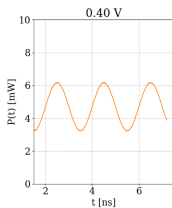
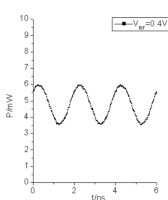
Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones



# Inyección Óptica

Jaime Díez

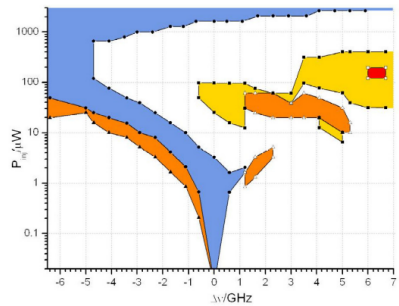
Láser de  
Semicon-  
ductor  
OFC  
Ec. de Balance  
Resolución  
estocástica  
Dinamica No  
Lineal

Láser en  
Solitario  
Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones



# Inyección Óptica

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

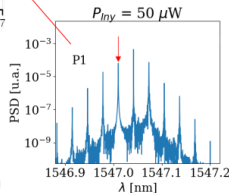
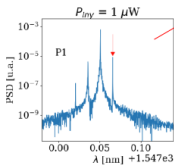
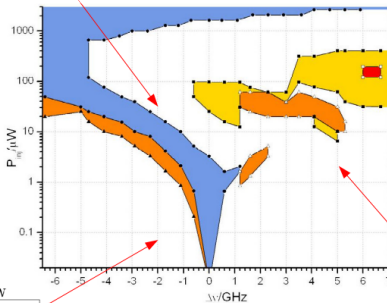
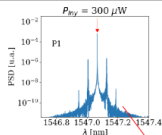
Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones



# Inyección Óptica

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

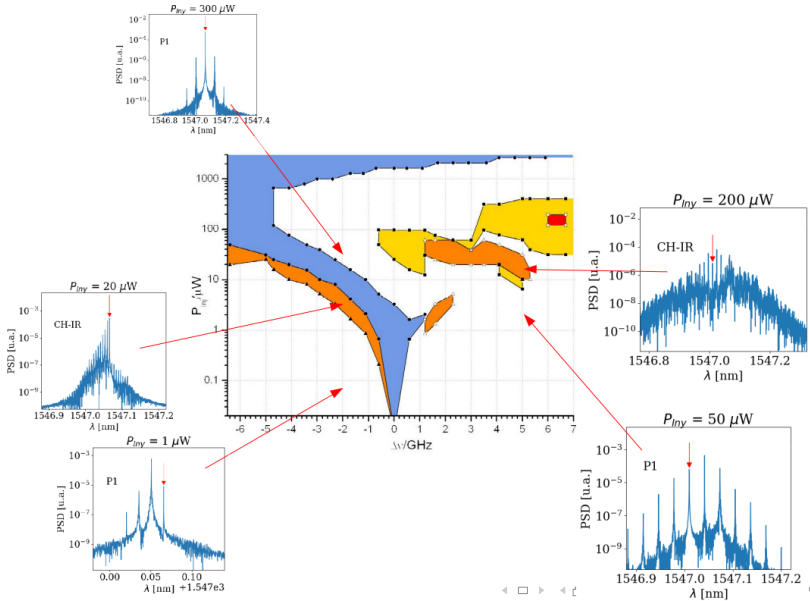
OFC  
Ec. de Balance  
Resolución  
estocástica  
Dinámica No  
Lineal

Láser en  
Solitario  
Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones



# Inyección Óptica

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

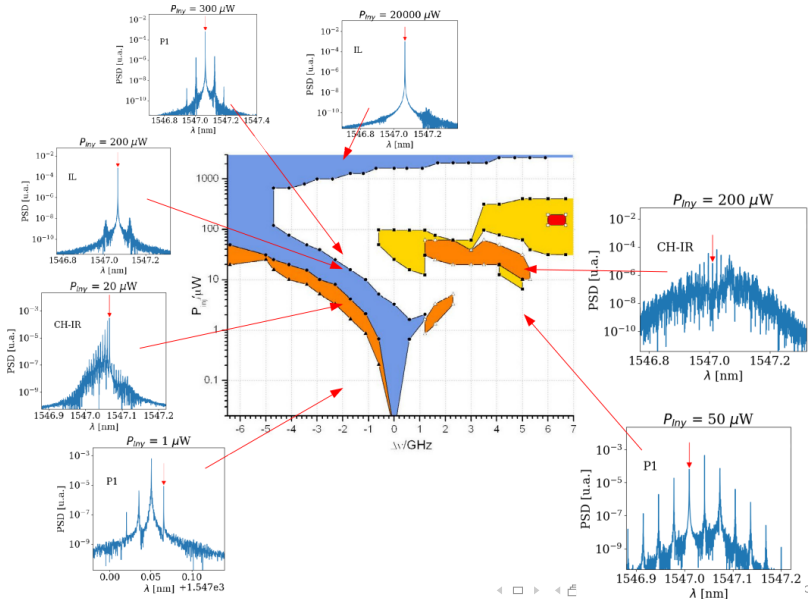
Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones



# Inyección Óptica

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

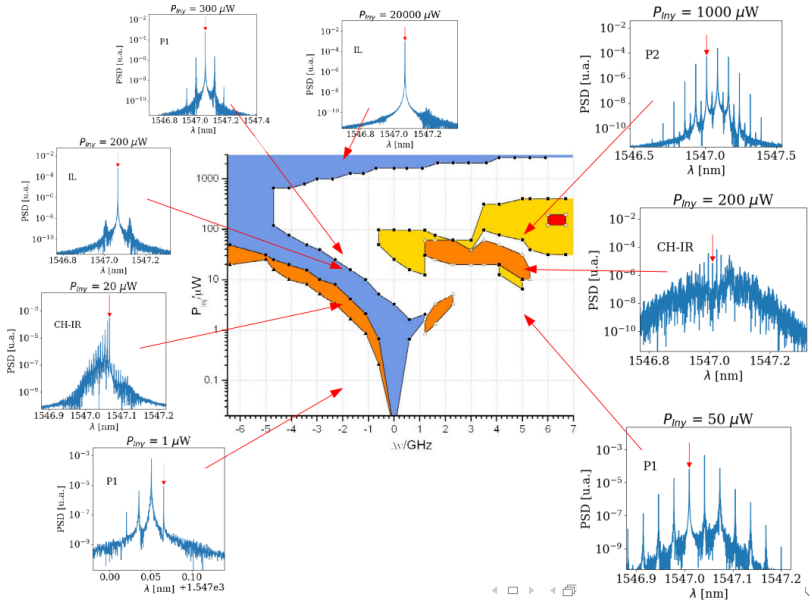
Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones



# Bloqueo por Inyección y OFC

Jaime Díez

Láser de  
Semiconductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

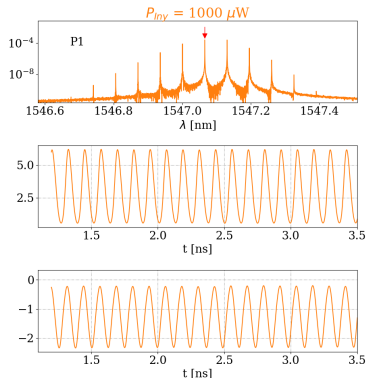
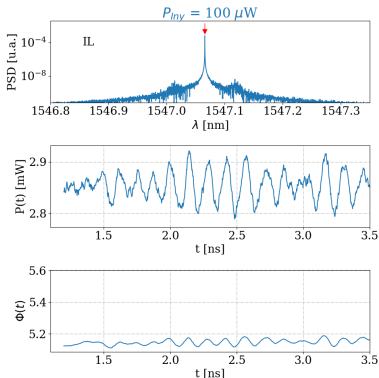
Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones



# Inyección Óptica en G-S

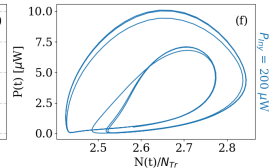
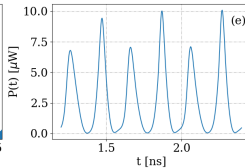
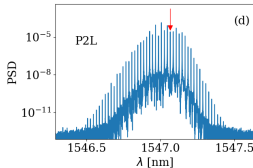
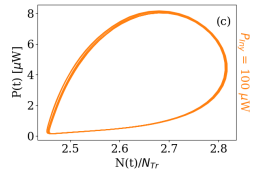
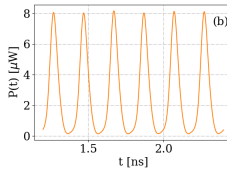
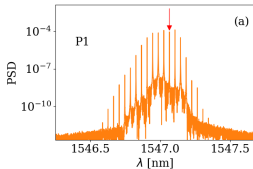
Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor  
OFC  
Ec. de Balance  
Resolución  
estocástica  
Dinámica No  
Lineal

Láser en  
Solitario  
Encendido por  
Ganancia  
Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones





# Inyección Óptica en G-S

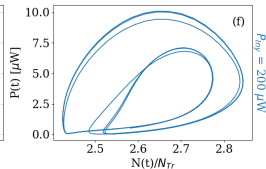
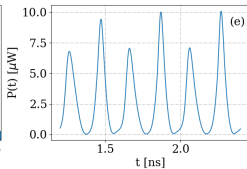
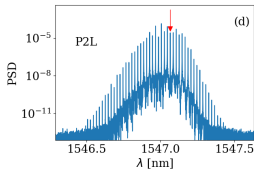
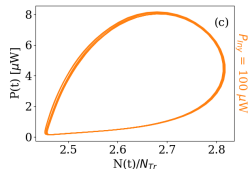
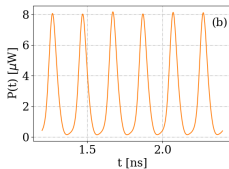
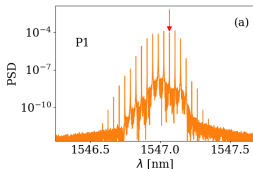
Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor  
OFC  
Ec. de Balance  
Resolución  
estocástica  
Dinámica No  
Lineal

Láser en  
Solitario  
Encendido por  
Ganancia  
Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones



Se obtiene la bifurcación de doblamiento de periodo

# Inyección Óptica en G-S

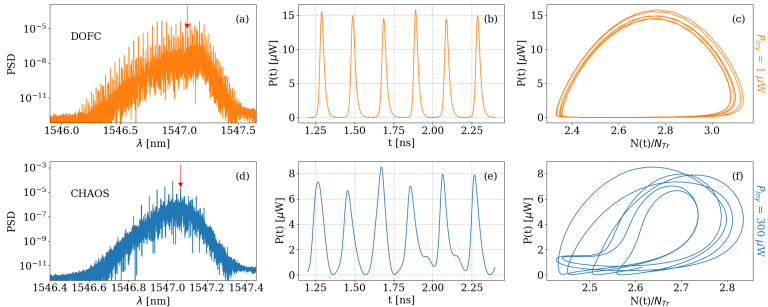
Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor  
OFC  
Ec. de Balance  
Resolución  
estocástica  
Dinámica No  
Lineal

Láser en  
Solitario  
Encendido por  
Ganancia  
Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones



# Conclusiones

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinamica No  
Lineal

Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones

- Se ha observado la creación y destrucción de los OFC en función de la amplitud. Así como la mayor irregularidad para bajas frecuencias.

# Conclusiones

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones

- Se ha observado la creación y destrucción de los OFC en función de la amplitud. Así como la mayor irregularidad para bajas frecuencias.
- Se han determinado las diferentes regiones dinámicas para distintos valores de la inyección.

# Conclusiones

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones

- Se ha observado la creación y destrucción de los OFC en función de la amplitud. Así como la mayor irregularidad para bajas frecuencias.
- Se han determinado las diferentes regiones dinámicas para distintos valores de la inyección.
- Se han obtenido bifurcaciones de Hopf y de doblamiento de periodo

# Conclusiones

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones

- Se ha observado la creación y destrucción de los OFC en función de la amplitud. Así como la mayor irregularidad para bajas frecuencias.
- Se han determinado las diferentes regiones dinámicas para distintos valores de la inyección.
- Se han obtenido bifurcaciones de Hopf y de doblamiento de periodo
- El programa desarrollado permite entender mejor los procesos físicos involucrados en la generación de OFC.

# Ruido Estocástico

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinamica No  
Lineal

Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones

Los términos de Langevin  $F_S$  y  $F_\Phi$  tienen las siguientes relaciones de correlación:

# Ruido Estocástico

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones

Los términos de Langevin  $F_S$  y  $F_\Phi$  tienen las siguientes relaciones de correlación:

$$\langle F_i(t) F_j(t') \rangle = 2\delta_{ij} \delta(t - t')$$

$$\langle F_i(t) \rangle = 0$$



# Ruido Estocástico

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones

Los términos de Langevin  $F_S$  y  $F_\Phi$  tienen las siguientes relaciones de correlación:

$$\langle F_i(t) F_j(t') \rangle = 2\delta_{ij} \delta(t - t')$$

$$\langle F_i(t) \rangle = 0$$

Representan ruido blanco adicional debidos a la emisión espontánea

# Modelo Computacional

- Se realiza la transformada rápida de Fourier FFT por lo que el tiempo de la ventana ha de cumplir:

$$\frac{t_{Total}}{\Delta N} = 2^n$$

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinamica No  
Lineal

Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones

# Modelo Computacional

- Se realiza la transformada rápida de Fourier FFT por lo que el tiempo de la ventana ha de cumplir:

$$\frac{t_{Total}}{\Delta N} = 2^n$$

- Las frecuencias de la FFT realizada para un paso de  $\Delta N$  viene dado por el intervalo:

$$\left[-\frac{1}{2\Delta N}, \frac{1}{2\Delta N}\right)$$

# Modelo Computacional

- Se realiza la transformada rápida de Fourier FFT por lo que el tiempo de la ventana ha de cumplir:

$$\frac{t_{Total}}{\Delta N} = 2^n$$

- Las frecuencias de la FFT realizada para un paso de  $\Delta N$  viene dado por el intervalo:

$$\left[-\frac{1}{2\Delta N}, \frac{1}{2\Delta N}\right)$$

- Hay que sumar una cantidad para que el espectro quede centrado en la frecuencia de emisión  $\nu$ .

$$\nu_{th} - \frac{C(I)}{2\pi}$$

# Transitorio

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

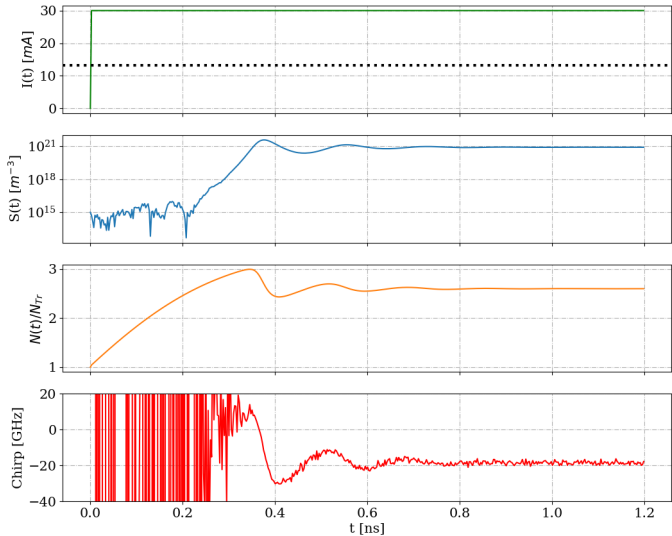
Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones



# Doblamiento de Periodo en IL

Jaime Díez

Láser de  
Semiconductor

OFC

Ec. de Balance

Resolución  
estocástica

Dinámica No  
Lineal

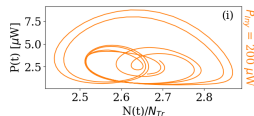
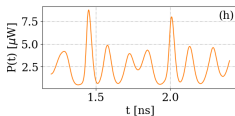
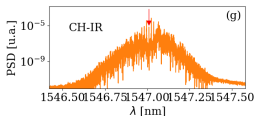
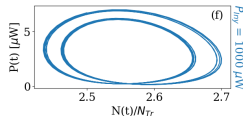
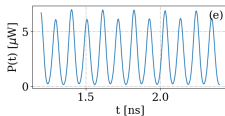
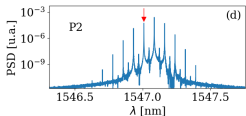
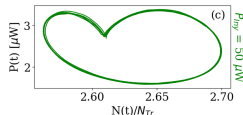
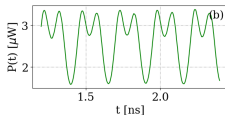
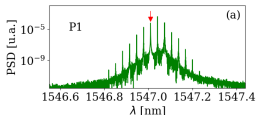
Láser en  
Solitario

Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones



# Inyección Óptica en G-S

Jaime Díez

Láser de  
Semicon-  
ductor  
OFC  
Ec. de Balance  
Resolución  
estocástica  
Dinámica No  
Lineal

Láser en  
Solitario  
Encendido por  
Ganancia

Inyección  
de Luz

G-S con IO

Conclusiones

