

光电子器件仿真紧凑模型库说明书

中国科学院半导体研究所

陈冠良，宋志刚编著

2024.12

版本：1.0

器件库版本：1.0



版权所有©中国科学院半导体研究所

所有权利保留。未经书面许可，不得擅自分发或复制该说明书的任何内容。

目录

1	简介	1
2	一般说明	1
3	激光器	3
3.1	双异质结激光器	3
3.2	量子阱激光器	9
3.3	DFB激光器	14
3.4	VCSEL	22
3.5	电调制激光器	36
4	一般光源	39
4.1	普通光源	39
4.2	LED	41
5	光电探测器	42
5.1	PIN雪崩光电探测器	42
5.2	PIN光电探测器	52
5.3	MSM光电探测器	55
6	光电调制器（除微环调制器外）	61
6.1	理想幅值调制器	61
6.2	理想相位调制器	62
6.3	理想频率调制器	63
6.4	理想马赫曾德调制器	64
6.5	基本马赫曾德调制器	66
6.6	含折射率变化的马赫曾德调制器	68
6.7	理想电吸收调制器	75
6.8	基本电吸收调制器	76
7	微环	78
7.1	理想微环谐振器	78
7.2	理想光分插滤波器	81
7.3	基本微环调制器	84
7.4	基本微环调制器（含电压）	88
7.5	基本光分插滤波器	92
7.6	基本光分插滤波器（含电压）	97
7.7	含折射率变化的微环调制器	102
7.8	含折射率变化的光分插滤波器	109
8	光放大器	116
8.1	EDFA光放大器	116
8.2	SOA光放大器	118

9 无源器件	120
9.1 直波导（模式耦合）	120
9.2 弯曲波导（模式耦合）	123
9.3 直波导（光学长度）	126
9.4 MMI(1×2)	127
9.5 MMI(2×2)	130
9.6 简单增益	132
9.7 简单相移	133
9.8 标准滤波器	134
9.9 高斯滤波器	136
9.10 理想合束器	138
9.11 基本二输入合束器	141
9.12 理想分束器	144
9.13 基本二输出分束器	147
9.14 理想X形耦合器	150
9.15 基本X形耦合器	152
10 工具	155
10.1 随机数生成器	155
10.2 PAM4随机数生成器	156
10.3 频率输入调试器	157
10.4 光信号复数输出	158

1 简介

该模型库使用Verilog-A语言编写，可用于大多数EDA平台¹。该模型库中包含激光器、探测器、调制器、光放大器、无源器件等多种光电子器件的紧凑模型。该模型库中的模型采用了速率方程、行波方程、等效电路、传输矩阵多种模型建立，底层采用物理公式，使得模型结果更为准确。

这些模型能够反映这些器件的物理特性，且能够进行链路层级的仿真。我们对部分模型给出了示例，其中一些模型给出了对比结果，基本符合预期。

由于作者在资历尚浅，模型库中可能有一些错误，敬请各位批评指正！

2 一般说明

模型使用

该模型库的发布文件主要为Verilog-A源代码（.va文件），这些文件需要按照所使用的EDA平台的模型生成方式生成相关模型，若无报错即可正常使用。EDA软件生成模型时可能不会按照图片中的位置生成端口，请注意。

单位

对于所有含单位的输入参数，其单位均在参数表中给出。如典型值未写出单位，该值的单位为左侧单位栏中的内容。单位栏为空则代表单位为1。

部分参数的单位可由其他参数控制以便于向模型中输入不同单位的数值。该参数在参数表中会标注出所有单位，其典型值也会给出对应的单位。

比较常见的可变单位为损耗类的参数，一般使用控制参数`alpha_use_dBm`控制其单位。损耗类的参数的单位为 m^{-1} 和dB/m两种，其换算关系如下：

$$\alpha(m^{-1}) = \alpha(dB/m) / 10 \cdot \ln(10)$$

输入文件

部分模型需要数据表作为仿真的基础，故需要读取文本文件。考虑到Linux的兼容性问题，模型库中的所有模型均只接受LF行尾，UTF-8编码的文本文件。不同模型接受的文件格式并不相同，文件的具体写法请见各模型。

光信号描述与端口

EDA工具的一条导线可描述一个信号的势和流两种数据（如电信号为电压和电流），标准的va物理定义表中没有光信号的定义方案。考虑到信号输出显示的直观性和计算的稳定性，我们采用了功率、相位、波长三路信号共同表达一个光信号，使用电压（V）作为信号的载体，不使用对应的电流信号。此外，我们提供了将功率相位转换为复数的工具。

基于此，该模型库的光学端口以三个为一组，分别传递光信号的功率（W）、相位（°）、波长（m）信息。传播功率的端口用`pow`标注，传播相位的端口用`phase`标注，传播波长的端口用`lam`标注。

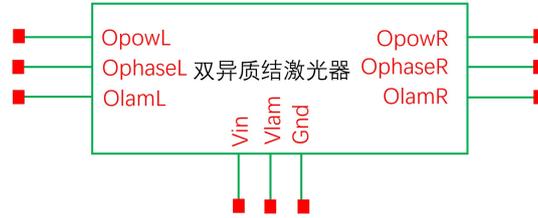
¹仅保证在EDA平台中可正常使用，可能需要针对EDA平台手动从Verilog-A文件生成器件。

所有端口的第一个大写字母用于标识端口的类型。I为输入光信号的光学端口，O为输出光信号的光学端口，V为电学端口，T为热学端口。

3 激光器

3.1 双异质结激光器

模型样式



端口

	端口名称	描述
电端口	Vin	电流输入
	Vlam	波长控制
光端口	OpowL	左端面功率输出
	OphaseL	左端面相位输出
	OlamL	左端面波长输出
	OpowR	右端面功率输出
	OphaseR	右端面相位输出
	OlamR	右端面波长输出
接地	Gnd	接地

参数

参数	单位	值域	典型值
L 谐振腔长度	m	$(0, \infty)$	$2.5e-4$
W 谐振腔宽度	m	$(0, \infty)$	$1e-6$
D 谐振腔高度	m	$(0, \infty)$	$1.5e-7$
An1 非辐射复合一次项系数	s^{-1}	$[0, \infty)$	$1e8$
An2 非辐射复合二次项系数	$m^3 \cdot s^{-1}$	$[0, \infty)$	$1.1e-17$
An3 非辐射复合三次项系数	$m^6 \cdot s^{-1}$	$[0, \infty)$	$2e-41$
An4 非辐射复合泄漏项系数	$m^{3(A-1)} \cdot s^{-1}$	$[0, \infty)$	0

参数	单位	值域	典型值
A 非辐射复合泄漏项指数		$(3, \infty)$	3.5
Ar1 辐射复合一次项系数	s^{-1}	$[0, \infty)$	4.2e8
Ar2 辐射复合二次项系数	$m^3 \cdot s^{-1}$	$[0, \infty)$	1.5e-16
GAM 光限制因子		$(0, 1]$	0.3
G0 增益系数	$m^3 \cdot s^{-1}$	$(0, \infty)$	1.4e-12
Ntr 透明载流子浓度	m^{-3}	$(0, \infty)$	1.5e24
EPS 增益压缩因子	m^3	$[0, \infty)$	1e-25
B 增益非线性指数		$[0, \infty)$	1
Bsp 自发辐射复合系数		$[0, 1]$	1e-3
ALFA 有源区内部损耗	m^{-1}	$[0, \infty)$	2000
Rl 左端面反射系数		$[0, 1)$	0.3
Rr 右端面反射系数		$[0, 1)$	0.3
Ne 平衡载流子浓度	m^{-3}	$(0, \infty)$	7.8e7
EIT 理想因子		$[0, 1]$	2
Nr 折射率		$(0, \infty)$	3.5
Vbi 内建势	V	$(0, \infty)$	1.13
Csc0 零偏结电容	F	$[0, \infty)$	1e-11
Rs 寄生串联电阻	Ω	$[0, \infty)$	5
Cp 寄生并联电容	F	$[0, \infty)$	1e-12
Rd 寄生泄漏电阻	Ω	$[0, \infty)$	1e15

理论

双异质结激光器采用^[1]中的等效电路模型，其方程如下：

$$\frac{dn}{dt} = \frac{I_{in}}{eV_{act}} - R_n(n) - R_r(n) - \Gamma Gs \quad (1)$$

$$\frac{ds}{dt} = \Gamma Gs + \beta R_r(n) - \frac{s}{\tau_{ph}} \quad (2)$$

式中， n 为有源区过剩载流子浓度， I_{in} 为注入到有源区的电流， V_{act} 为有源区体积， $R_n(n)$ 为非辐射复合项， R_r 为辐射复合项， Γ 为光限制因子， G 为光增益， s 为平均光子密度， β 为自发辐射系数， τ_{ph} 为光子寿命。

载流子浓度同结电压 V_j 的关系由Shcokley关系给出：

$$N = N_e \left[\exp\left(\frac{V_j}{\eta V_T}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

式中， N_e 是平衡态少数载流子浓度， $V_T = kT/q$ ， η 为理想因子，一般在1-2之间取值。

考虑到 $\xi S \ll 1$ ，光增益 G 由下式给出：

$$G = g_0 (N - N_{tr}) (1 - \xi S) \quad (4)$$

式中， g_0 为光增益常数， N_{tr} 为透明载流子浓度， ξ 为光增益压缩因子。光子寿命 τ_{ph} 由下式给出：

$$\tau_{ph} = \left[\Gamma c' \alpha_{int} - \frac{c'}{2L} \ln(R_L R_R) \right]^{-1} \quad (5)$$

式中， c' 为有源区光速， α_{int} 为光功率吸收系数， R_L 和 R_R 为两个腔面的反射系数， L 为腔长。

将（3）带入到（1）中，两侧乘 qV_{act} ，整理得

$$I_{in} = C_d \frac{dV_j}{dt} + I_n + I_r + I_{st} \quad (6)$$

式中， C_d 为结扩散电容， I_n 为非辐射电流， I_r 为辐射复合电流， I_{st} 为受激复合电流。上述参量的表达式为：

$$C_d = \frac{qV_{act}N_e}{\eta V_T} \exp\left(\frac{V_j}{\eta V_T}\right) \quad (7)$$

$$I_n = qV_{act}R_n(N) \quad (8)$$

$$I_r = qV_{act}R_r(N) \quad (9)$$

$$I_{st} = qV_{act}\Gamma Gs \quad (10)$$

（2）式两侧乘 qV_{act} ，整理得

$$\beta I_r + I_{st} = C_{ph} \frac{dV_{ph}}{dt} + \frac{V_{ph}}{R_{ph}} \quad (11)$$

式中，

$$V_{ph} = SV_{act}V_T \quad (12)$$

$$C_{ph} = q/V_T \quad (13)$$

$$R_{ph} = V_T \tau_{ph} / q \quad (14)$$

双异质结激光器的两个输出腔面的输出功率可由下式获得：

$$P_L = \theta_L V_{ph} \quad (15)$$

$$P_R = \theta_R V_{ph} \quad (16)$$

式中

$$\theta_L = \frac{c' E_{ph}}{2LV_T} \cdot \frac{\sqrt{R_R} (1 - R_L)}{\sqrt{R_R} (1 - R_L) + \sqrt{R_L} (1 - R_R)} \ln \left(\frac{1}{R_L R_R} \right) \quad (17)$$

$$\theta_R = \frac{c' E_{ph}}{2LV_T} \cdot \frac{\sqrt{R_L} (1 - R_R)}{\sqrt{R_L} (1 - R_R) + \sqrt{R_R} (1 - R_L)} \ln \left(\frac{1}{R_L R_R} \right) \quad (18)$$

其中 E_{ph} 为光子能量，即 $E_{ph} = h\nu$ 。

示例

使用的原理图如图1所示。使用电流源Id对激光器提供直流电流和交流小信号电流，使用电流源I3为激光器提供脉冲电流，使用电压源V0控制激光器的输出波长，使用一组电阻来代替理想探测器。测量OpowL或OpowR端口的光功率信号即可获得该激光器的工作情况。使用该原理图进行直流仿真、脉冲仿真、频率响应仿真，可得到图2-4中的结果。

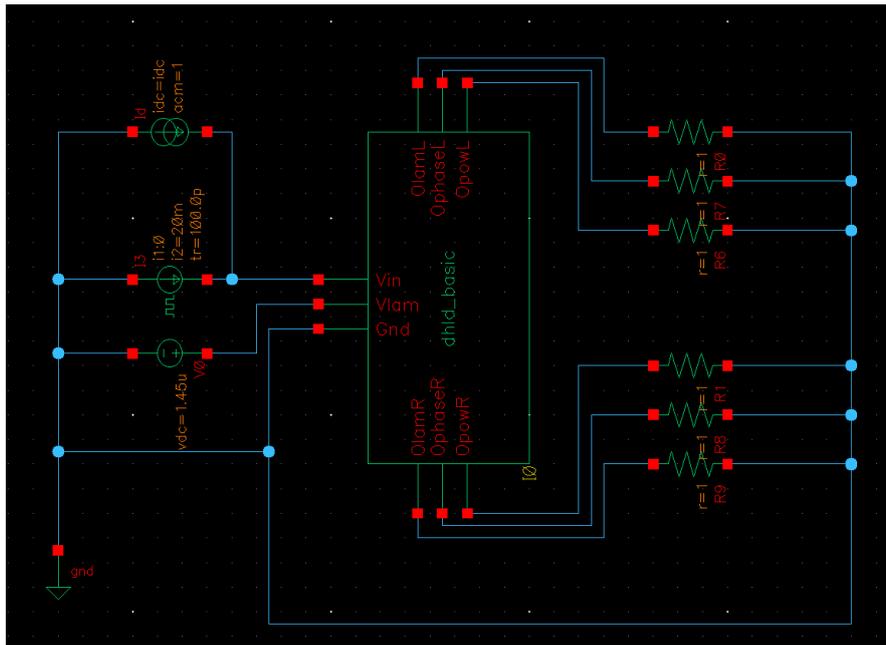


图 1: 双异质结激光器仿真原理图

参考文献

[1] 陈维友, 杨树人, 刘式壝. 光电子器件模型与OEIC模拟[M]. 国防工业出版社, 2001.

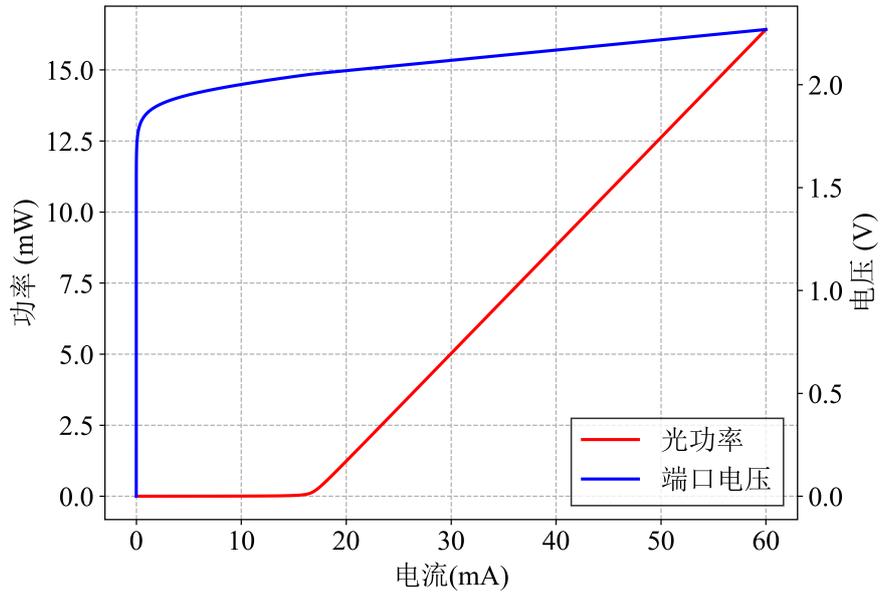


图 2: 双异质结激光器直流仿真结果

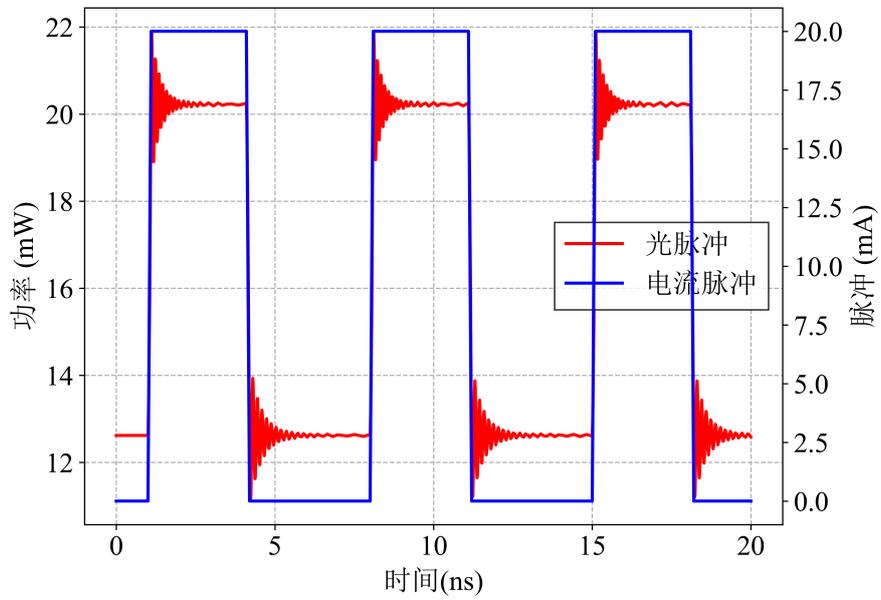


图 3: 双异质结激光器脉冲响应仿真结果

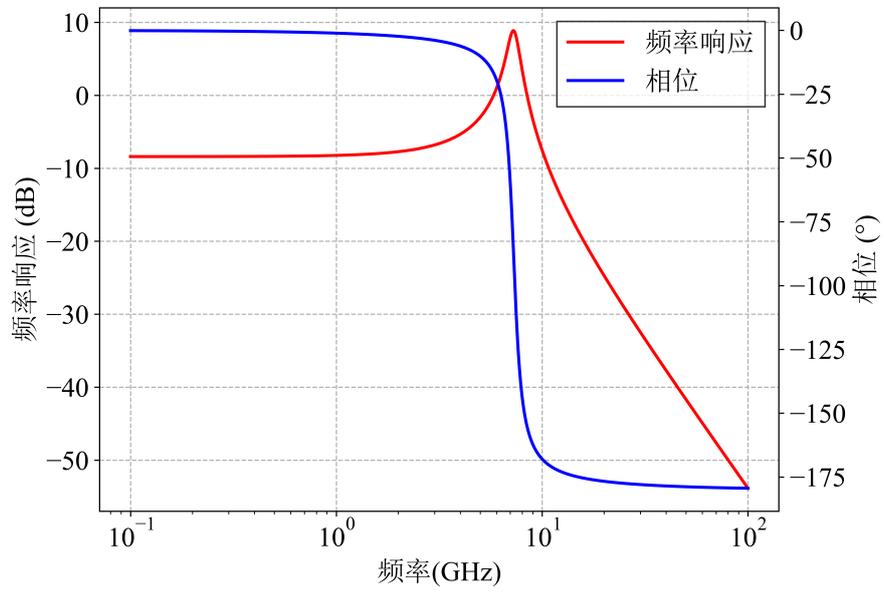
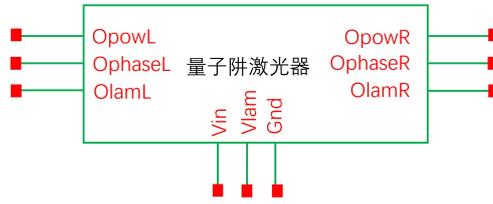


图 4: 双异质结激光器频率响应仿真结果

3.2 量子阱激光器

模型样式



端口

	端口名称	描述
电端口	Vin	电流输入
	Vlam	波长控制
光端口	OpowL	左端面功率输出
	OphaseL	左端面相位输出
	OlamL	左端面波长输出
	OpowR	右端面功率输出
	OphaseR	右端面相位输出
	OlamR	右端面波长输出
接地	Gnd	接地

参数

参数	单位	值域	典型值
Vw 量子阱区体积	m ³	(0,∞)	6e-18
Vs SCH区体积	m ³	(0,∞)	6e-17
tau_s SCH区载流子渡越时间	s	(0,∞)	6e-12
tau_e 热离子辐射寿命	s	(0,∞)	2e-10
tau_n 双分子复合寿命	s	(0,∞)	1.25e-10
tau_p 光子寿命	s	(0,∞)	1e-12
Gamma 光限制因子		(0,1]	0.4
xi 增益压缩因子		(0,∞)	1.5e-23

参数	单位	值域	典型值
beta 自发辐射系数		[0,1]	1e-4
g0 增益系数	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	(0,∞)	7.2e-12
Nom 穿通载流子浓度	m^{-3}	(0,∞)	1e24
eta 结理想因子		(0,∞)	2
Cn 电容归一化参数	$\text{F} \cdot \text{m}^{-3}$	(0,∞)	1
Rl 左端面反射系数		[0,1]	0.3
Rr 右端面反射系数		[0,1]	0.3
Nr 折射率		(0,∞)	3.5
L 谐振腔长度	m	(0,∞)	5e-4

理论

量子阱激光器采用^[1]的等效电路模型。该模型使用的方程如下：

$$\frac{dN_s}{dt} = \frac{I}{\alpha_s} - \frac{N_s}{\tau_s} + \frac{N_w \left(\frac{\alpha_w}{\alpha_s} \right)}{\tau_e} \quad (19)$$

$$\frac{dN_w}{dt} = \frac{N_s \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_w} \right)}{\tau_s} - \frac{N_w}{\tau_n} - \frac{N_w}{\tau_e} - \frac{G(N_w, S) S}{1 + \xi S} \quad (20)$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\Gamma G(N_w, S) S}{1 + \xi S} - \frac{S}{\tau_p} + \Gamma \beta \frac{N_w}{\tau_n} \quad (21)$$

式中， N_s 为分离限制异质结（SCH）区域的载流子浓度， α_s 为SCH区域体积和电子电荷的乘积， τ_s 为SCH区域载流子渡越时间， N_w 为量子阱区域的载流子浓度， α_w 为量子阱区域体积和电子电荷的乘积， τ_e 为热离子辐射寿命， τ_n 为双分子复合寿命， τ_p 为光子寿命， ξ 为增益压缩因子， S 为光子密度， G 为光增益， Γ 为光限制因子， β 为自发辐射系数。令

$$I_n = \frac{\alpha_w N_w}{\tau_n} \quad (22)$$

$$V_s = \frac{q N_s}{C_n} \quad (23)$$

$$I_{\text{stim}} = \frac{\Gamma \alpha_w G(N_w, S) S_n S'}{1 + \xi S} \approx \Gamma \alpha_w G(N_w, S) S_n S' \quad (24)$$

式中 C_n 为电容归一化参数， S_n 为光子密度归一化参数， $S = \Gamma S' S_n$ 。代入公式(19)-(21)并整理，得到如下的电路方程：

$$I + \frac{\tau_n}{\tau_e} I_n = \frac{V_s}{R_{SCH}} + C_{SCH} \frac{dV_s}{dt} \quad (25)$$

$$I_s = \frac{V_s}{R_{SCH}} - \frac{\tau_n}{\tau_e} I_n = I_n + \tau_n \frac{dI_n}{dt} + I_{stim} \quad (26)$$

$$I_{stim} = \frac{S}{R_{CH}} + C_{CH} \frac{dS}{dt} - \beta I_n \quad (27)$$

式中各电学元件的表达式如下：

$$R_{SCH} = \frac{q\gamma\tau_s}{\alpha_w C_n} \quad (28)$$

$$C_{SCH} = \frac{\alpha_w C_n}{q\gamma} \quad (29)$$

$$R_{CH} = \frac{\tau_p}{\alpha_w S_n} \quad (30)$$

$$C_{CH} = \alpha_w S_n \quad (31)$$

式中 $\gamma = \frac{\alpha_w}{\alpha_s}$ 。光增益 G 由下式给出：

$$G(N_w, S) = \frac{g_o(N_w - N_{om})}{\sqrt{\frac{N_w}{10^{24}} + \sqrt{\frac{N_{om}}{10^{24}}}}} \quad (32)$$

式中 g_o 为微分增益系数。

量子阱激光器的对光输出的处理采用了和双异质结激光器相同的方式^[2]：

$$P_L = \theta_L V_{ph} \quad (33)$$

$$P_R = \theta_R V_{ph} \quad (34)$$

式中

$$\theta_L = \frac{c'E_{ph}}{2LV_T} \cdot \frac{\sqrt{R_R}(1 - R_L)}{\sqrt{R_R}(1 - R_L) + \sqrt{R_L}(1 - R_R)} \ln\left(\frac{1}{R_L R_R}\right) \quad (35)$$

$$\theta_R = \frac{c'E_{ph}}{2LV_T} \cdot \frac{\sqrt{R_L}(1 - R_R)}{\sqrt{R_L}(1 - R_R) + \sqrt{R_R}(1 - R_L)} \ln\left(\frac{1}{R_L R_R}\right) \quad (36)$$

其中 E_{ph} 为光子能量，即 $E_{ph} = h\nu$ 。

示例

使用的原理图与双异质结激光器类似，如图5所示。使用电流源Id对激光器提供直流电流和交流小信号电流，使用电流源I3为激光器提供脉冲电流，使用电压源V0控制激光器的输出波长，使用一组电阻来代替理想探测器。测量OpowL或OpowR端口的光功率信号即可获得该激光器的工作情况。使用该原理图进行直流仿真、脉冲仿真、频率响应仿真，可得到图6-8中的结果。

参考文献

- [1] 高建军. 高速光电子器件建模及光电集成电路设计技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [2] 陈维友, 杨树人, 刘式壝. 光电子器件模型与OEIC模拟[M]. 国防工业出版社, 2001.

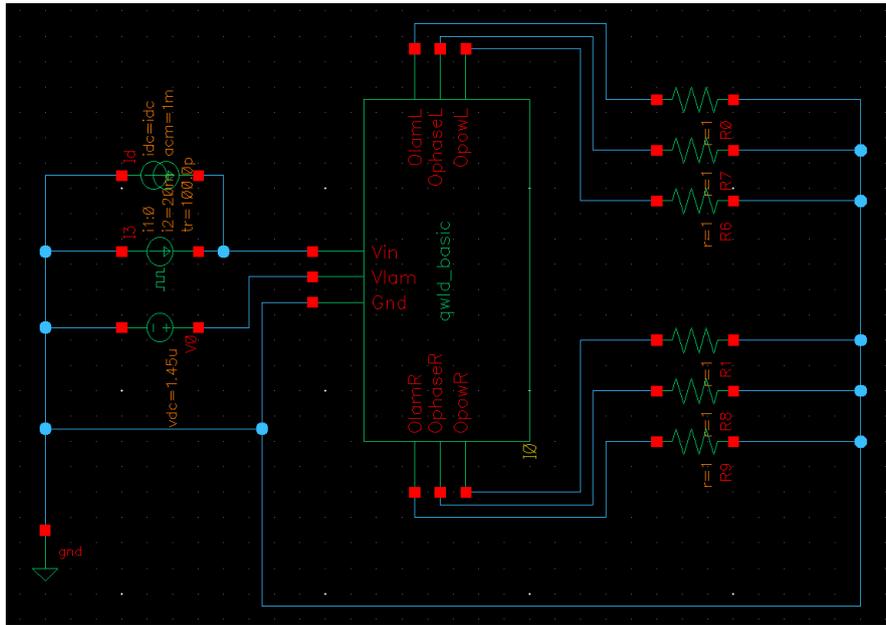


图 5: 量子阱激光器仿真原理图

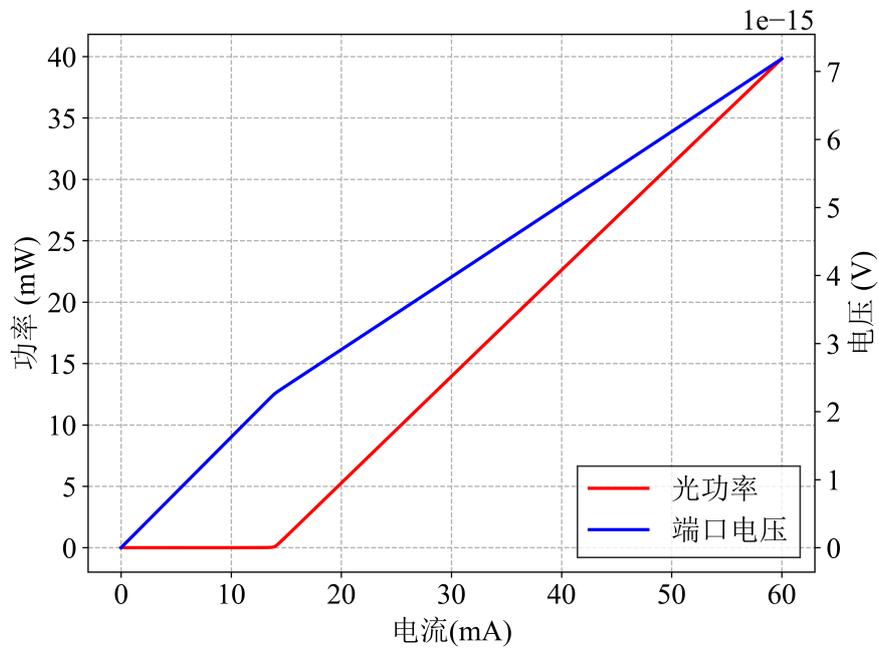


图 6: 量子阱激光器直流仿真结果

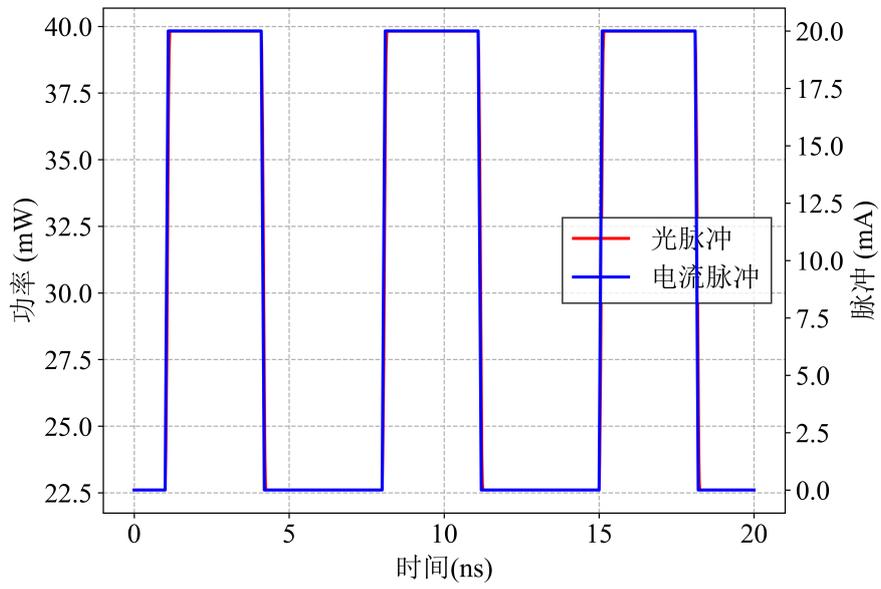


图 7: 量子阱激光器脉冲响应仿真结果

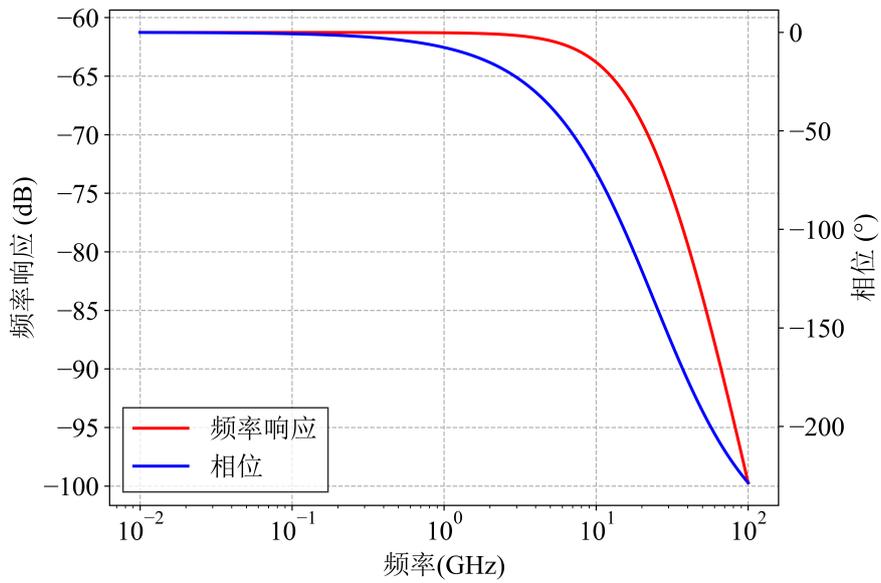
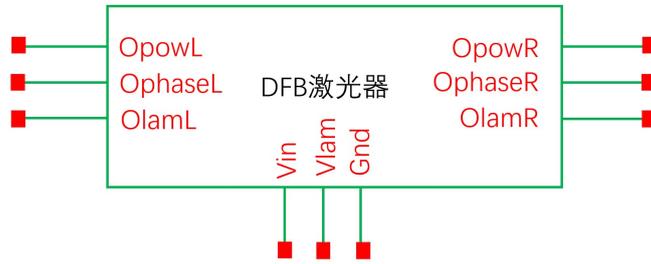


图 8: 量子阱激光器频率响应仿真结果

3.3 DFB激光器

模型样式



端口

	端口名称	描述
电学端口	Vin	电流输入
	Vlam	波长控制
光学端口	OpowL	左端面功率输出
	OpowR	右端面功率输出
	OphaseL	左端面相位输出
	OphaseR	右端面相位输出
	OlamL	左端面波长输出
	OlamR	右端面波长输出
接地	Gnd	接地

参数

参数	单位	值域	典型值
L 谐振腔长度	m	$[0, \infty)$	$3e-4$
W 谐振腔宽度	m	$[0, \infty)$	$1.5e-6$
D 谐振腔高度	m	$[0, \infty)$	$2e-7$
GAM 光限制因子		$[0, 1)$	0.3
T 陷阱辅助复合寿命	s	$[0, \infty)$	$1e-8$
BEATsp 自发辐射系数		$[0, \infty)$	$5e-5$
ID 有源区材料标志	不适用	$[0, 1]$	0

参数	单位	值域	典型值
G0 增益系数	m^{-1}	$[0, \infty)$	2.5e4
Ntr 透明载流子浓度	m^{-3}	$[0, \infty)$	1e24
EPS 增益压缩因子	m^3	$[0, \infty)$	6e-23
B 辐射复合系数	$m^3 \cdot s^{-1}$	$[0, \infty)$	1e-16
A 俄歇复合系数	$m^6 \cdot s^{-1}$	$[0, \infty)$	7.5e-41
Rl 左端面折射率		$[0, 1)$	1e-8
Rr 右端面折射率		$[0, 1)$	1e-8
ALFA0 有源区内部损耗	m^{-1}	$[0, \infty)$	5000
Q1 光子寿命参数1		$[0, \infty)$	1.9998
Q2 光子寿命参数2	m	$[0, \infty)$	1.4391e-4
Rat 调整参数	$m^3 \cdot s^{-1}$	$[0, \infty)$	1
Ng 群折射率		$[0, \infty)$	3.6
N0 平衡载流子浓度	m^{-3}	$[0, \infty)$	6.5e13
Vbi 内建势垒	V	$[0, \infty)$	1.13
EIT 理想因子		$[0, \infty)$	2
Rs 寄生串联电阻	Ω	$[0, \infty)$	1e-5
Cp 寄生并联电容	F	$[0, \infty)$	0
Rd 寄生泄漏电阻	Ω	$[0, \infty)$	1e15
Csc0 零偏结电容	F	$[0, \infty)$	0

理论

该模型根据^[1]中的等效电路模型搭建。假设DFB激光器处在单纵模工作状态下，电场的分布可以写成如下形式：

$$E(x, y, z, t) = \Phi(x, y)E(z, t) \quad (37)$$

其中

$$E(z, t) = F(z, t) \exp(-j\beta_0 z + j\omega t) + B(z, t) \exp(j\beta_0 z + j\omega t) \quad (38)$$

式中， $\Phi(x, y)$ 描述电场的横向分布， F 、 B 分别表示正向和反向传播光场（包括波导内和波导外）随 z 缓慢变化的包络， $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$ 为工作角频率； ω_0 为参考角频率 $\beta_0 = m\pi/\Lambda$ 为参考传播常数， Λ 为Bragg波长， m 为光栅阶数，实际传播常数为 $\beta = 2\pi\bar{n}_{\text{eff}}/\lambda_0$ ， \bar{n}_{eff} 为有效折射率； λ_0 为对应的真空波长。

关于 F 、 B 的耦合波方程为

$$\frac{1}{v_g} \cdot \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial z} = j\kappa^* B - \left(j\delta + j\frac{\Delta\omega}{v_g} - g' + \alpha' - \frac{J_{\text{sp}}}{|F|^2} \right) F \quad (39)$$

$$\frac{1}{v_g} \cdot \frac{\partial B}{\partial t} - \frac{\partial B}{\partial z} = j\kappa F - \left(j\delta + j\frac{\Delta\omega}{v_g} - g' + \alpha' - \frac{J_{\text{sp}}}{|B|^2} \right) B \quad (40)$$

式中， v_g 为有源区光速， $\kappa = \kappa_r + j\kappa_i$ 是光栅耦合系数， $\delta = \beta - \beta_0$ 表示折射率变化对布拉格条件的偏离， $\Delta\omega/v_g$ 表示频率变化对布拉格条件的偏离， $\alpha' = \frac{\alpha_{\text{int}}}{2}$ 为光场幅度吸收系数， α_{int} 为光功率吸收系数， $g' = \frac{\Gamma g}{2}$ 为有效光场幅度增益， Γ 为有源区光功率限制因子， g 为有源区内平均光功率增益。

J_{sp} 为自发发射的贡献，可写作

$$J_{\text{sp}} = \frac{2\hbar\omega\beta_{\text{sp}}C_b N^2}{4\varepsilon_0\bar{n}_g^2 v_g} \quad (41)$$

式中， $\hbar\omega$ 为光子能量， β_{sp} 为自发发射系数， C_b 为辐射复合系数， \bar{n}_g 为群折射率， ε_0 为真空介电常数。

光增益表达式为

$$g = \frac{g_0(N/N_{\text{tr}} - 1)}{1 + \varepsilon S} \quad (42)$$

式中， g_0 为增益系数， N_{tr} 为有源区透明载流子密度， ε 为增益压缩因子。

F 和 B 的幅值和相位信息由下式给出：

$$F = A_f \exp(j\phi_f) \quad (43)$$

$$B = A_b \exp(j\phi_b) \quad (44)$$

设 $U_f = A_f^2$ ， $U_b = A_b^2$ ， $\phi = \phi_f - \phi_b$ ，将(43)和(44)代入(39)和(40)，整理得

$$\frac{1}{v_g} \cdot \frac{\partial U_f}{\partial t} + \frac{\partial U_f}{\partial z} = 2A_f A_b [\kappa_i \cos \phi + \kappa_r \sin \phi] + 2(g' - \alpha') U_f + 2J_{\text{sp}} \quad (45)$$

$$\frac{1}{v_g} \cdot \frac{\partial \phi_f}{\partial t} + \frac{\partial \phi_f}{\partial z} = \frac{A_b}{A_f} [\kappa_r \cos \phi - \kappa_i \sin \phi] - \left(\delta + \frac{\Delta\omega}{v_g} \right) \quad (46)$$

$$\frac{1}{v_g} \cdot \frac{\partial U_b}{\partial t} - \frac{\partial U_b}{\partial z} = -2A_f A_b [\kappa_i \cos \phi + \kappa_r \sin \phi] + 2(g' - \alpha') U_b + 2J_{\text{sp}} \quad (47)$$

$$\frac{1}{v_g} \cdot \frac{\partial \phi_b}{\partial t} - \frac{\partial \phi_b}{\partial z} = \frac{A_f}{A_b} [\kappa_r \cos \phi - \kappa_i \sin \phi] - \left(\delta + \frac{\Delta\omega}{v_g} \right) \quad (48)$$

对上述公式进行整理，并令 $U_t = U_f + U_b$ ，可得

$$\frac{1}{v_g} \cdot \frac{\partial U_f}{\partial t} + \frac{\partial (U_f - U_b)}{\partial z} = 2(g' - \alpha') U_t + 4J_{sp} \quad (49)$$

$$\frac{1}{v_g} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial (\phi_f + \phi_b)}{\partial z} = \frac{(U_b - U_f) [\kappa_r \cos \phi - \kappa_i \sin \phi]}{A_f A_b} \quad (50)$$

对(49)两侧积分，并作载流子密度和光增益在腔长方向分布均匀的假设，有

$$\int_0^L \frac{\partial (U_f - U_b)}{\partial z} dz = (1 - R_R) U_f(L) + (1 - R_L) U_b(0) \equiv Q_1 U_f(L) \quad (51)$$

$$\int_0^L 4J_{sp} dz = \frac{2\hbar\omega L}{\varepsilon_0 \bar{n}_g^2 v_g} \beta_{sp} C_b n^2 \quad (52)$$

$$\int_0^L U_t dz = \int_0^L (U_f + U_b) dz \equiv Q_2 U_f(L) \quad (53)$$

光子密度 S 可由下式给出：

$$S = \frac{\varepsilon_0 \bar{n}_g^2 Q_2 U_f(L)}{2\hbar\omega L} \quad (54)$$

将(51)-(54)代入(47)，可得到DFB激光器的大信号模型所用的载流子浓度速率方程：

$$\frac{dS}{dt} = \Gamma v_g g S - \frac{S}{\tau_{ph}} + \beta_{sp} C_b N^2 \quad (55)$$

式中， τ_{ph} 为光子寿命，表达式为

$$\tau_{ph} = \frac{Q_2}{v_g (\alpha_{int} Q_2 + Q_1)} \quad (56)$$

上述公式中的 Q_1 和 Q_2 需要单独计算。为求解 Q_1 和 Q_2 ，需考虑(39)和(40)的稳态形式，如下：

$$\frac{dF}{dz} = j\kappa^* B - \eta F + i_f \quad (57)$$

$$-\frac{dB}{dz} = j\kappa F - \eta B + i_b \quad (58)$$

式中， $\eta = -g' + \alpha' + j(\delta + \Delta\omega/v_g)$ ， $i_f i_f^* = i_b i_b^* = J_{sp}$ 。上述方程的通解为

$$F(z) = \frac{1}{\Phi} \{-j\kappa^* \sinh[(\theta L - z)] B(0) + [\theta \cosh(\theta z) - \eta \sinh(\theta z)] F(L)\} + \frac{\eta i_f + j\kappa^* i_b}{\theta^2} \quad (59)$$

$$B(z) = \frac{1}{\Phi} \{[\theta \cosh[\theta(L - z)] - \eta \sinh[\theta(L - z)]] B(0) - j \sinh(\theta z) F(L)\} + \frac{\eta i_b + j i_f}{\theta^2} \quad (60)$$

式中， $\Phi = \theta \text{sh}(\theta L) - \eta \text{sh}(\theta L)$ ， $\theta^2 = \kappa \kappa^* + \eta^2$ 。

考虑到 $F(0) = r_L B(0)$ ， $B(L) = r_R F(L)$ ，其中 $|r_L^2| = R_L$ ， $|r_R^2| = R_R$ ，有

$$\theta F(L) = [r_L \Phi + j\kappa^* \sinh(\theta L)] B(0) \quad (61)$$

$$[r_R \Phi + j\kappa \sinh(\theta L)] F(L) = \theta B(0) \quad (62)$$

整理得到震荡条件

$$\theta^2 = [r_L \Phi + j\kappa^* \sinh(\theta L)] [r_R \Phi + j\kappa \sinh(\theta L)] \quad (63)$$

由(51)和(61)，可得到 Q_1 的表达式：

$$Q_1 = 1 - R_R + \frac{(1 - R_L)(\theta_i^2 + \theta_r^2)}{|r_L \Phi + j\kappa^* \sinh(\theta L)|^2} \quad (64)$$

式中, $\theta = \theta_r + j\theta_i$ 。将(63)代入(64)即可得到 Q_1 。忽略自发辐射, 考虑(59)-(63), 做积分

$$\int_0^L [F(z)F(z)^* + B(z)B(z)^*] dz \quad (65)$$

并与(53)比较, 即可得到 Q_2 。

DFB激光器的大信号模型所用的载流子浓度速率方程如下所示:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I_j}{qV_{\text{act}}} - \frac{N}{\tau} - C_b N^2 - C_a N^3 - \Gamma v_g g S \quad (66)$$

式中, N 为有源区过剩载流子浓度, I_j 为注入到有源区的电流, V_{act} 为有源区体积, τ 为陷阱辅助复合寿命, C_a 为俄歇复合系数, C_b 为辐射复合系数。

DFB激光器中载流子浓度与结电压的关系由下式给出:

$$N = N_e \left[\exp\left(\frac{V_j}{\Theta V_T}\right) - 1 \right] \quad (67)$$

式中, N_e 是平衡态少数载流子浓度, $V_T = \frac{kT}{q}$, Θ 为理想因子。

将(67)代入(66), 并在左右两侧乘 qV_{act} , 整理可得

$$I_j = C_d \frac{dV_j}{dt} + I_n + I_a + I_{\text{sp}} + I_{\text{st}} \quad (68)$$

式中各电路元件的表达式如下:

$$C_d = \frac{qV_{\text{act}}N_e}{\Theta V_T} \exp\left(\frac{V_j}{\Theta V_T}\right) \quad (69)$$

$$I_n = \frac{qV_{\text{act}}N}{\tau} \quad (70)$$

$$I_a = qV_{\text{act}}C_a N^3 \quad (71)$$

$$I_{\text{sp}} = qV_{\text{act}}C_b N^2 \quad (72)$$

$$I_{\text{st}} = q\Gamma V_{\text{act}}v_g g S \quad (73)$$

对(55)进行整理, 可得

$$I_{\text{st}} + \beta_{\text{sp}} I_{\text{sp}} = C_{\text{ph}} \frac{dS}{dt} + \frac{S}{R_{\text{ph}}} \quad (74)$$

式中各电路元件的表达式如下:

$$C_{\text{ph}} = qV_{\text{act}} \quad (75)$$

$$R_{\text{ph}} = \frac{\tau_{\text{ph}}}{qV_{\text{act}}} \quad (76)$$

DFB激光器大信号模型的输出功率由下式给出:

$$P_L = \xi_L S \quad (77)$$

$$P_R = \xi_R S \quad (78)$$

式中

$$\xi_L = \frac{\hbar\omega C_q V_{\text{act}} (1 - R_L) v_g}{Q_2} \quad (79)$$

$$\xi_R = \frac{\hbar\omega C_q V_{\text{act}} (1 - R_R) v_g}{Q_2} \quad (80)$$

示例

使用的原理图如图9所示。使用电流源I2对激光器提供直流电流和交流小信号电流，使用电压源V0控制激光器的输出波长，使用一组电阻来代替理想探测器。使用开关S0控制输入的时域信号，即由I1产生的脉冲信号或由随机信号发生器I4产生，由电压控制电流源G0控制的随机码电流信号。测量OpowL或OpowR端口的光功率信号即可获得该激光器的工作情况。使用该原理图进行直流仿真、脉冲仿真、频率响应仿真和眼图，可得到图10-13中的结果。

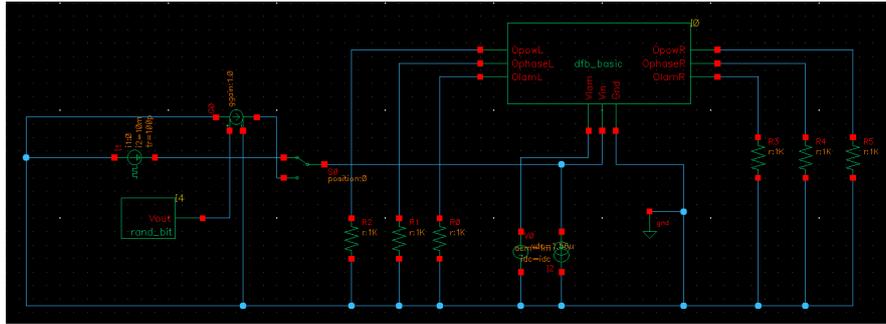


图 9: DFB激光器仿真原理图

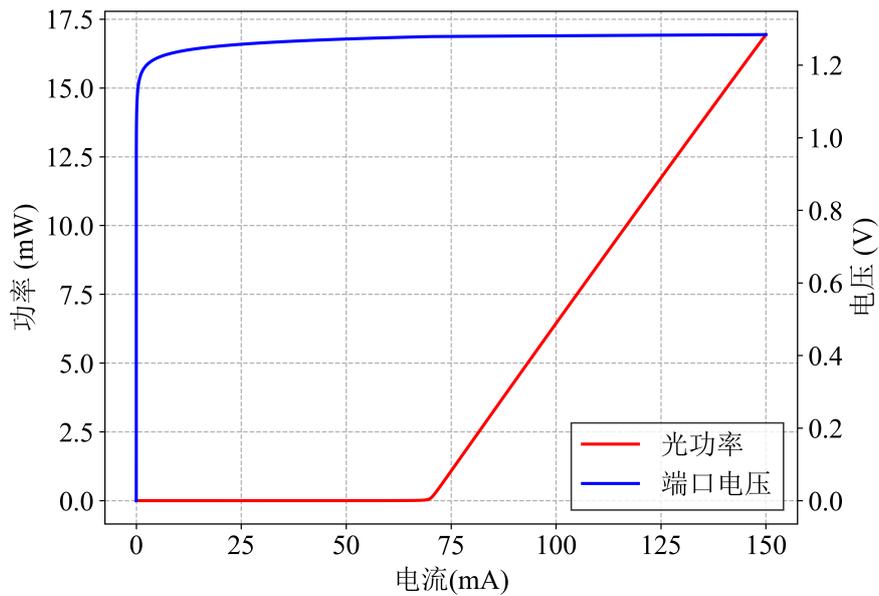


图 10: DFB激光器直流仿真结果

对比

我们使用文献^[1]中的数据，对直流仿真结果进行了对比，结果如图14所示。

参考文献

[1] 陈维友, 杨树人, 刘式壝. 光电子器件模型与OEIC模拟[M]. 国防工业出版社, 2001.

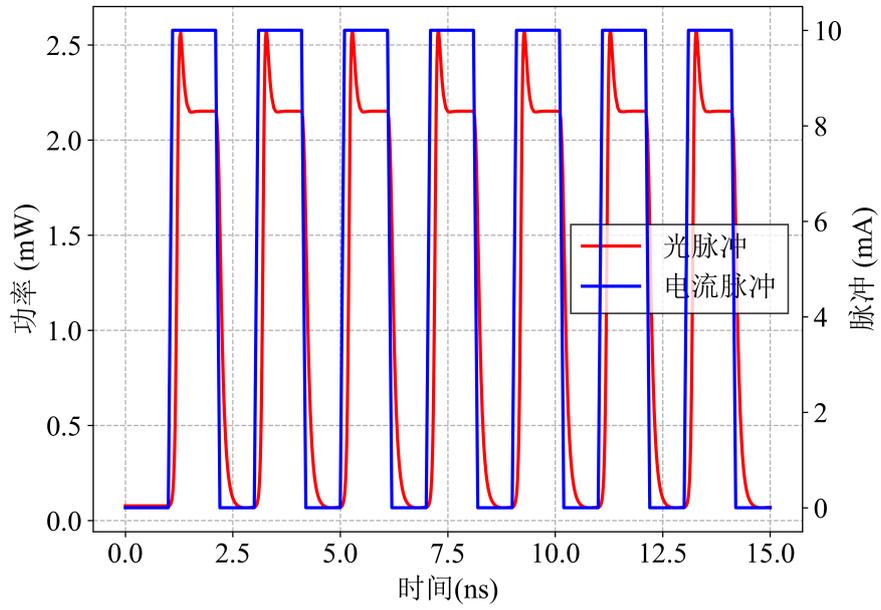


图 11: DFB激光器脉冲响应仿真结果

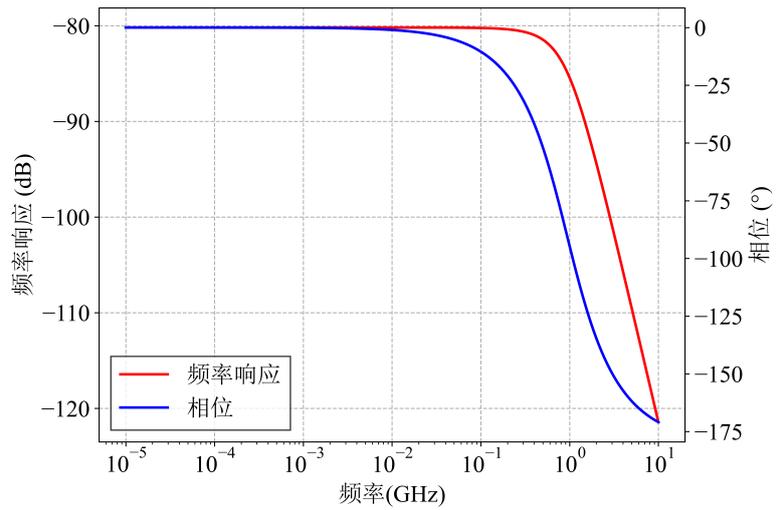


图 12: DFB激光器频率响应仿真结果

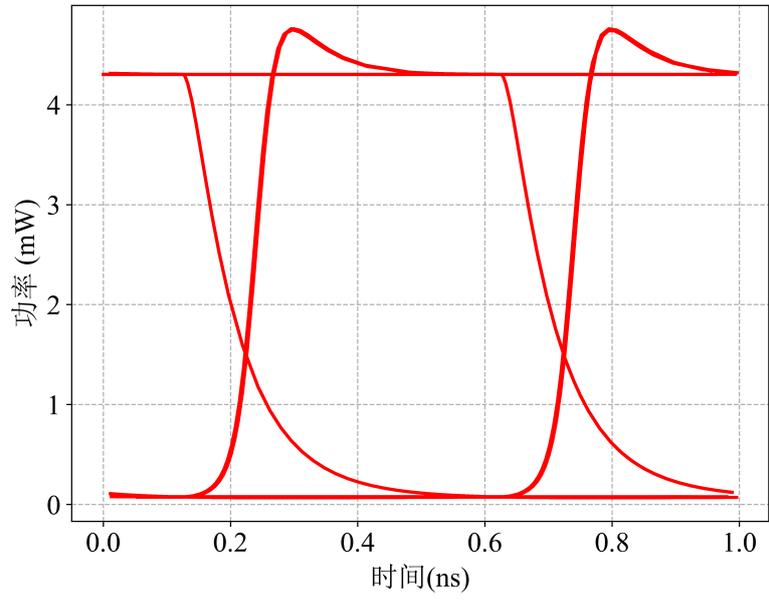


图 13: DFB激光器眼图仿真结果

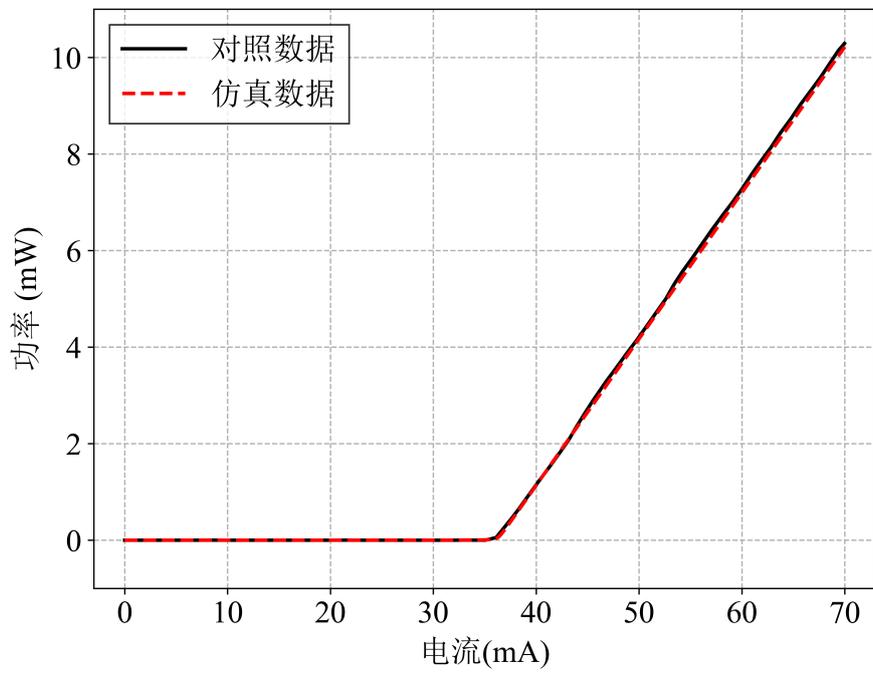
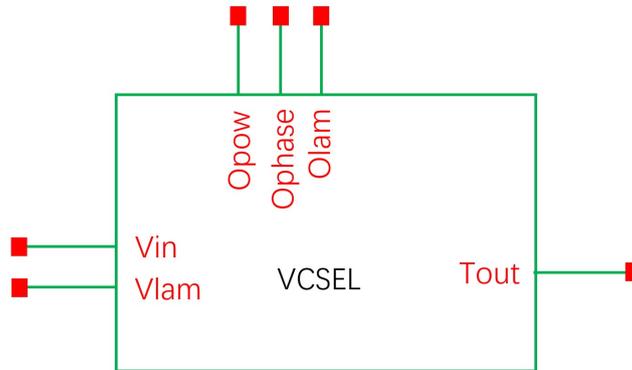


图 14: DFB激光器直流仿真结果对比

3.4 VCSEL

模型样式



端口

	端口名称	描述
电学端口	Vin	电流输入
	Vlam	波长控制
光学端口	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出
热学端口	Tout	器件温度输出
接地	Gnd	接地

参数

参数	单位	值域	典型值
Egart 室温下量子阱区域带隙	eV	(0,∞)	1.53
dEga 量子阱区域带隙一阶温度系数	eV · K ⁻¹	(-∞,∞)	-1.63e-3
meA 量子阱区域相对电子质量		(0,∞)	0.0622
mhhA 量子阱区域相对重空穴质量		(0,∞)	0.346
tcap 载流子俘获时间	s	(0,∞)	7e-12
etaA 量子阱区域复合电流理想因子		[0,∞)	1.6
etaesc 量子阱区域漏电流理想因子		[0,∞)	2

参数	单位	值域	典型值
A0A 量子阱区域理查德森常数	$A \cdot m^{-2} \cdot K^{-2}$	$(0, \infty)$	7.4e5
Art 室温下肖克莱复合系数	s^{-1}	$(-\infty, \infty)$	4.5e8
dA 肖克莱复合系数一阶温度系数	$s^{-1} \cdot K^{-1}$	$(-\infty, \infty)$	0
d2A 肖克莱复合系数二阶温度系数	$s^{-1} \cdot K^{-2}$	$(-\infty, \infty)$	0
Brt 室温下双分子复合系数	$m^3 \cdot s^{-1}$	$(-\infty, \infty)$	3e-16
dB 双分子复合系数一阶温度系数	$m^3 \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$	$(-\infty, \infty)$	-1.19e-18
d2B 双分子复合系数二阶温度系数	$m^3 \cdot s^{-1} \cdot K^{-2}$	$(-\infty, \infty)$	5.74e-21
Crt 室温下俄歇复合系数	$m^6 \cdot s^{-1}$	$(-\infty, \infty)$	-7.9e-42
dC 俄歇复合系数一阶温度系数	$m^6 \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$	$(-\infty, \infty)$	8.2e-44
d2C 俄歇复合系数二阶温度系数	$m^6 \cdot s^{-1} \cdot K^{-2}$	$(-\infty, \infty)$	-5.4e-46
Egbrt 室温下SCH区域带隙	eV	$(0, \infty)$	1.89
dEgb SCH区域带隙一阶温度系数	$eV \cdot K^{-1}$	$(-\infty, \infty)$	-4.5e-4
etainj SCH区域横向注入效率		$[0, 1]$	0.8
tspb SCH区域自发载流子复合寿命	s	$(0, \infty)$	5e-9
etaB SCH区域复合电流理想因子		$[0, \infty)$	1
etaleak SCH区域漏电流理想因子		$[0, \infty]$	2
A0B SCH区域理查德森常数	$A \cdot m^{-2}$	$(0, \infty)$	7.4e5
Egcr 室温下包层区域带隙	eV	$(0, \infty)$	2.31
dEgc 包层区域带隙一阶温度系数	$eV \cdot K^{-1}$	$(-\infty, \infty)$	4.94e-4
a0rt 室温下增益对数载流子浓度系数	m^{-1}	$(0, \infty)$	7.54e5

参数	单位	值域	典型值
da0 增益对数载流子浓度系数一阶温度系数	$m^{-1} \cdot K^{-1}$	$(-\infty, \infty)$	822
d2a0 增益对数载流子浓度系数二阶温度系数	$m^{-1} \cdot K^{-2}$	$(-\infty, \infty)$	2.66
a1d 增益-波长线性变化系数（波长小于增益峰值波长时）	m^{-2}	$(-\infty, \infty)$	-1.4e13
a1u 增益-波长线性变化系数（波长大于增益峰值波长时）	m^{-2}	$(-\infty, \infty)$	-1.34e13
a2d 增益-波长抛物线变化系数（波长小于增益峰值波长时）	m^{-3}	$(-\infty, \infty)$	1.57e20
a2u 增益-波长抛物线变化系数（波长大于增益峰值波长时）	m^{-3}	$(-\infty, \infty)$	2.03e21
N0rt 室温下透明载流子浓度	m^{-3}	$(0, \infty)$	2.76e24
dN0 透明载流子浓度一阶温度系数	$m^{-3} \cdot K^{-1}$	$(-\infty, \infty)$	9.22e21
Ns 增益-载流子浓度线性因子	m^{-3}	$(-\infty, \infty)$	-1.5e21
eps 增益压缩系数	m^3	$(0, 1]$	5e-24
lamgrt 室温下增益峰值波长	m	$(0, \infty)$	8.57e-7
dlamg 增益峰值波长一阶温度系数	$m \cdot K^{-1}$	$(-\infty, \infty)$	3.14e-10
dlamgdna 增益峰值波长一阶载流子浓度系数	m^4	$(-\infty, \infty)$	-3.26e-33
d2lamgdna 增益峰值波长二阶载流子浓度系数	m^7	$(-\infty, \infty)$	-5.44e-60
dlam 波长一阶温度系数	$m \cdot K^{-1}$	$(-\infty, \infty)$	6.4e-11
vg 群速度	$m \cdot s^{-1}$	$(0, \infty)$	1e8
gam 光限制因子		$(0, 1]$	0.0328
beta 自发辐射系数		$(0, 1]$	0.0468
alabsrt 室温下光吸收损失率	s^{-1}	$(0, \infty)$	6.19e10
dalabs 光吸收损失率一阶温度系数	$s^{-1} \cdot K^{-1}$	$(-\infty, \infty)$	0

参数	单位	值域	典型值
d2alabs 光吸收损失率二阶温度系数	$s^{-1} \cdot K^{-2}$	$(-\infty, \infty)$	7e6
albmrt 室温下底面损失率	s^{-1}	$(0, \infty)$	1.35e10
dalbm 底面损失率一阶温度系数	$s^{-1} \cdot K^{-1}$	$(-\infty, \infty)$	-1.5e8
altmrt 室温下顶面损失率	s^{-1}	$(0, \infty)$	1.91e11
daltm 顶面损失率一阶温度系数	$s^{-1} \cdot K^{-1}$	$(-\infty, \infty)$	-7e8
tth 器件热时间常数	s	$(0, \infty)$	1e-7
rthrt 室温下器件热阻抗	$K \cdot W^{-1}$	$(0, \infty)$	2800
drth 器件热阻抗一阶温度系数	W^{-1}	$(-\infty, \infty)$	2.5
nqw 量子阱数量		$(0, \infty)$	5
dqw 单个量子阱厚度	m	$(0, \infty)$	4e-9
dsch SCH区域厚度	m	$(0, \infty)$	7.4e-8
Aape SCH区电流限制孔径面积	m^2	$(0, \infty)$	3.85e-11
Lb 连接线电感	H	$[0, \infty)$	0
Rb 连接线电阻	Ω	$[0, \infty)$	0
Lp1 基板电感1	H	$[0, \infty)$	7.6e-11
Rp1 基板电阻1	Ω	$[0, \infty)$	0
Lp2 基板电感2	H	$[0, \infty)$	0
Rp2 基板电阻2	Ω	$[0, \infty)$	0
Cp 基板电容	F	$[0, \infty)$	5e-14
Rp3 基板电阻3	H	$[0, \infty)$	0.15

参数	单位	值域	典型值
rmrt 室温下量子阱区电阻	Ω	$[0, \infty)$	170
drm 量子阱区电阻一阶温度系数	$\Omega \cdot K^{-1}$	$(-\infty, \infty)$	-9.6e-1
d2rm 量子阱区电阻二阶温度系数	$\Omega \cdot K^{-2}$	$(-\infty, \infty)$	0.0138
d3rm 量子阱区电阻三阶温度系数	$\Omega \cdot K^{-3}$	$(-\infty, \infty)$	-1.11e-4
Cm1 量子阱区电容1	F	$[0, \infty)$	2.02e-15
Cm2 量子阱区电容2	F	$[0, \infty)$	1.95e-14
Cm3 量子阱区电容3	F	$[0, \infty)$	8.86e-14
Cdep 耗尽电容	F	$[0, \infty)$	5e-14
meB SCH区域相对电子质量		$[0, \infty)$	5e-14
mhhB SCH区域相对重空穴质量		$[0, \infty)$	5e-14
etaRm1 量子阱区电阻1占比		$[0, \infty)$	5e-14
etaRm2 量子阱区电阻2占比		$[0, \infty)$	5e-14
etaRm3 量子阱区电阻3占比		$[0, \infty)$	5e-14

理论

我们采用了^[1]的方案，通过建立等效电路模型来搭建紧凑模型。

该模型中载流子速率方程如下：

$$\frac{dn_B}{dt} = i_{inj} - i_{sp,B} - i_{cap} + i_{esc} - i_{leak} \quad (81)$$

$$\frac{dn_A}{dt} = i_{cap} - i_{sp,A} - i_{esc} - i_{st} \quad (82)$$

上述方程中，(81)表达了SCH区域的载流子，即 n_B ，(82)表达了量子阱区域的载流子，即 n_A 。(81)右侧各项中， i_{inj} 与注入电流有关，表达式如下：

$$i_{inj} = \eta_{inj,xy} \cdot \frac{I_{SCH}}{q} \quad (83)$$

上式中, I_{SCH} 代表了注入电流, $\eta_{\text{inj},xy}$ 代表了SCH区域横向注入效率。 $i_{\text{sp},B}$ 代表了SCH区域的自发复合, 表达式如下:

$$i_{\text{sp},B} = \frac{n_B}{\tau_{\text{sp},B}} \quad (84)$$

式中 $\tau_{\text{sp},B}$ 为SCH区域自发电流子复合寿命, i_{cap} 表达了从SCH区域进入量子阱区的载流子, 表达式如下:

$$i_{\text{cap}} = \frac{n_B}{\tau_{\text{cap}}} \quad (85)$$

上式中, τ_{cap} 为载流子俘获时间, i_{esc} 表达了从量子阱区域逃逸回SCH区域的载流子, 表达式如下:

$$i_{\text{esc}}(n_A, T) = \frac{A_{0,A} \cdot V_A \cdot T^2}{q \cdot d_A} \cdot \exp\left(-\frac{E_{g,B}(T)}{\eta_{\text{esc}} \cdot k \cdot T}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{E_{f,A}(n_A, T)}{\eta_{\text{esc}} \cdot k \cdot T}\right) - 1\right] \quad (86)$$

上式中, $A_{0,A}$ 为量子阱区域理查德森常数, V_A 为量子阱区域体积, d_A 为量子阱区域厚度, 即单个量子阱厚度乘量子阱数量。 $E_{g,B}$ 为SCH区域的带隙, η_{esc} 为量子阱区域漏电流理想因子, $E_{f,A}$ 为量子阱区域的准费米能级。 i_{leak} 表达了SCH区域向外泄漏的载流子, 其表达式如下:

$$i_{\text{leak}}(n_B, T) = \frac{A_{0,B} \cdot V_B \cdot T^2}{q \cdot d_B} \cdot \exp\left(-\frac{E_{g,C}(T)}{\eta_{\text{leak}} \cdot k \cdot T}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{E_{f,B}(n_B, T)}{\eta_{\text{leak}} \cdot k \cdot T}\right) - 1\right] \quad (87)$$

上式中, $A_{0,B}$ 为SCH区域理查德森常数, V_B 为SCH区域体积, d_B 为SCH区域厚度。 $E_{g,C}$ 为包层区域的带隙, η_{leak} 为SCH区域漏电流理想因子, $E_{f,B}$ 为SCH区域的准费米能级。

准费米能级 $E_{f,A}$ 和 $E_{f,B}$ 由下式给出:

$$E_{f,A}(n_A, T) = E_{g,A}(T) + \sum_{i=e, hh} k \cdot T \cdot \ln \left[\exp\left(\frac{h^2 \cdot d_{\text{QW}} \cdot n_A / V_A}{4\pi \cdot k \cdot T \cdot m_0 \cdot m_{i,A}}\right) - 1 \right] \quad (88)$$

$$E_{f,B}(n_B, T) = E_{g,B}(T) + \sum_{i=C, V} k \cdot T \cdot \left[\frac{\ln\left(\frac{n_B / V_B}{N_i(T)}\right)}{1 - \left(\frac{n_B / V_B}{N_i(T)}\right)^2} + \frac{\left(\frac{3\sqrt{\pi} \cdot n_B / V_B}{4 \cdot N_i(T)}\right)^{2/3}}{1 + \left[0.24 + 1.08 \cdot \left(\frac{3\sqrt{\pi} \cdot n_B / V_B}{4 \cdot N_i(T)}\right)^{2/3}\right]^{-2}} \right] \quad (89)$$

式中 η_A 和 η_B 分别为量子阱区域和SCH区域的复合电流理想因子, $E_{g,A}$ 为量子阱区域的带隙, $m_{e,A}$ 和 $m_{hh,A}$ 为量子阱区域电子和重空穴的相对质量, N_C 和 N_V 代表了导带和价带的态密度, 由下式给出:

$$N_C(T) = 2 \cdot \left(\frac{2\pi \cdot m_0 \cdot m_{e,B} \cdot k \cdot T}{h^2}\right)^{3/2} \quad (90)$$

$$N_V(T) = 2 \cdot \left(\frac{2\pi \cdot m_0 \cdot m_{hh,B} \cdot k \cdot T}{h^2}\right)^{3/2} \quad (91)$$

式中 $m_{e,B}$ 和 $m_{hh,B}$ 为SCH区域电子和重空穴的相对质量。

(82)右侧各项中, $i_{\text{sp},A}$ 代表了量子阱区域的载流子自发复合, 表达式如下:

$$i_{\text{sp},A}(n_A, T) = A(T) \cdot n_A + B(T) \cdot \frac{n_A^2}{V_A} + C(T) \cdot \frac{n_A^3}{V_A^2} \quad (92)$$

式中, A 、 B 、 C 分别代表SCH复合、辐射复合和俄歇复合。 i_{st} 表达了受激复合产生的光子, 由下式给出:

$$i_{\text{st}}(n_A, S, T) = \Gamma \cdot v_g \cdot g(n_A, S, T) \cdot S \quad (93)$$

式中, S 为光子数量, Γ 是光限制因子, v_g 为群速度, $g(n_A, S, T)$ 为光增益系数, 由下式给出:

$$g(n_A, S, T) = \left\{ a_0(T) \cdot \ln \left(\frac{n_A/V_A + N_S}{N_0(T) + N_S} \right) - a_1 \cdot (\lambda(T) - \lambda_g(T)) - a_2 \cdot (\lambda(T) - \lambda_g(T))^2 \right\} \cdot \left[\frac{1}{1 + \varepsilon \cdot S \cdot \Gamma/V_A} \right] \quad (94)$$

式中, λ 是输出波长, λ_g 是增益峰值波长, ε 是增益压缩因子, N_0 是透明载流子浓度, N_S 是增益-载流子浓度线性因子, a_0 、 a_1 、 a_2 均为增益-载流子浓度相关的系数。

令 $U_A = f_A \cdot n_A$, $U_B = f_B \cdot n_B$, 并在(81)和(82)左右乘以元电荷 q , 经整理即可得到等效电路方程。

该模型的光子速率方程如下:

$$\frac{dS}{dt} = i_{st} + i_{sp} - i_{abs} - i_{bm} - i_{tm}, \quad (95)$$

式中, i_{st} 表达了受激复合产生的光子, 由(93)给出, i_{sp} 表达了自发辐射复合产生的光子, 由下式给出:

$$i_{sp} = \beta \cdot B(T) \cdot \frac{n_A^2}{V_A} \quad (96)$$

上式中 β 为自发辐射系数。 i_{abs} 表达了被吸收的光子数, 由下式给出:

$$i_{abs} = \alpha_{abs}(T) \cdot S \quad (97)$$

上式中 α_{abs} 为光吸收损失率。 i_{bm} 表达了从底面逸出的光子数, 由下式给出:

$$i_{bm} = \alpha_{bm}(T) \cdot S \quad (98)$$

上式中 α_{bm} 为底面损失率。 i_{tm} 表达了从顶面逸出的光子数, 由下式给出:

$$i_{tm} = \alpha_{tm}(T) \cdot S \quad (99)$$

上式中 α_{tm} 为顶面损失率。 VCSEL的光输出从顶面发射, 故顶面逸出的光子数将影响光输出功率, 关系如下:

$$P_{out} = \frac{h \cdot c}{\lambda(T)} \cdot i_{tm} \quad (100)$$

与对(81)和(82)的处理类似, 令 $U_S = f_S \cdot S$, 在(95)左右乘以元电荷 q , 经整理即可得到等效电路方程。

VCSEL的外部电路如图15所示。该电路考虑了金丝、电极板以及包层的电学属性, 各电学元件的信息详见参数表。SCH区电压由下式给出:

$$U_{SCH}(I_{SCH}, T) \approx \frac{n_A \cdot E_{f,A}(n_A, T) + n_B \cdot E_{f,B}(n_B, T)}{q \cdot (n_A + n_B)} \quad (101)$$

该模型考虑了温度效应。器件温度变化由下式给出:

$$\frac{\tau_{th}(T)}{r_{th}(T)} \cdot \frac{dT}{dt} = g_{gen} - g_{diss} \quad (102)$$

上式中, τ_{th} 是器件的热时间常数, r_{th} 为器件的热阻抗。 g_{gen} 表达了热量的产生, g_{diss} 表达了热量的消耗, 二者由下述公式表达:

$$g_{gen}(T) = U \cdot I - P_{out} \quad (103)$$

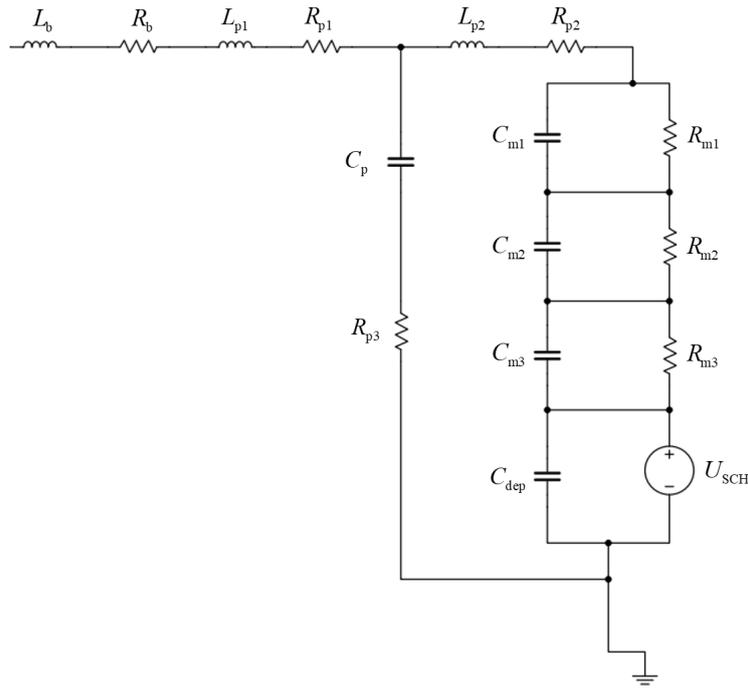


图 15: VCSEL外部电路

$$g_{\text{diss}}(T) = \frac{1}{r_{\text{th}}(T)} \cdot (T - T_{\text{amb}}) \quad (104)$$

令 $U_T = f_T \cdot T$ ，即可得到对应的电路方程。

此外，上述所有方程中所有带 (T) 的变量均和器件温度相关。该模型中的温度变化由对温度进行泰勒展开（部分变量会同时对载流子浓度进行展开），展开阶数最多为二阶，具体展开阶数请参照参数表。

示例

使用的原理图如图16所示。使用电流源I1对激光器提供直流电流，使用电压源V0控制激光器的输出波长，使用一组电阻来代替理想探测器。使用开关S7和S4控制输入的时域信号，即由I1产生的脉冲信号或由随机信号发生器I10产生，由电压控制电流源G1控制的随机码电流信号。未使用的信号经电阻流入接地以防止仿真出现错误。测量Opow端口的光功率信号即可获得该激光器的光输出情况，测量Olam端口的光功率信号即可获得该激光器的波长变化情况，测量Vin端口的电压即可获得该激光器的I-V情况。测量热学端口Tout的温度信号即可获得该激光器的温度变化情况。使用该原理图进行直流仿真、脉冲仿真，可得到图17-22中的结果。

对比

我们使用文献^[1]中的数据，对直流仿真、输入I-V关系、波长变化、温度变化结果进行了对比，结果如图23-26所示。

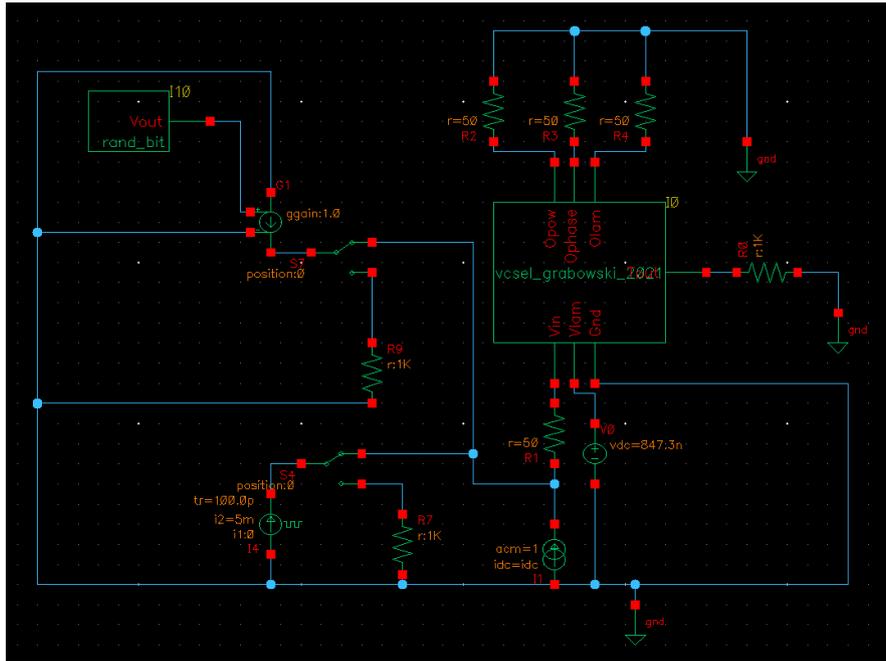


图 16: VCSEL仿真原理图

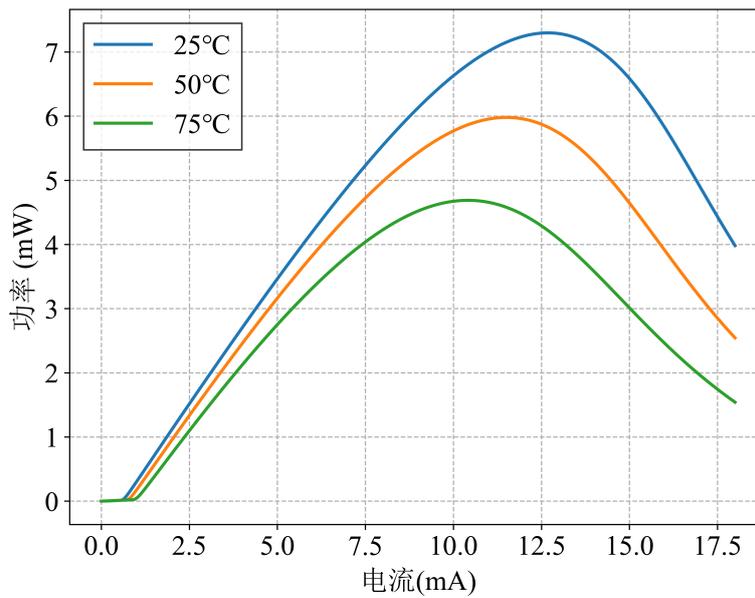


图 17: VCSEL直流仿真结果

参考文献

- [1] GRABOWSKI A, GUSTAVSSON J, HE Z S, et al. Large-Signal Equivalent Circuit for Datacom VCSELs[J/OL]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(10): 3225-3236 [2023-08-01]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9372754/>. DOI: 10.1109/JLT.2021.3064465.

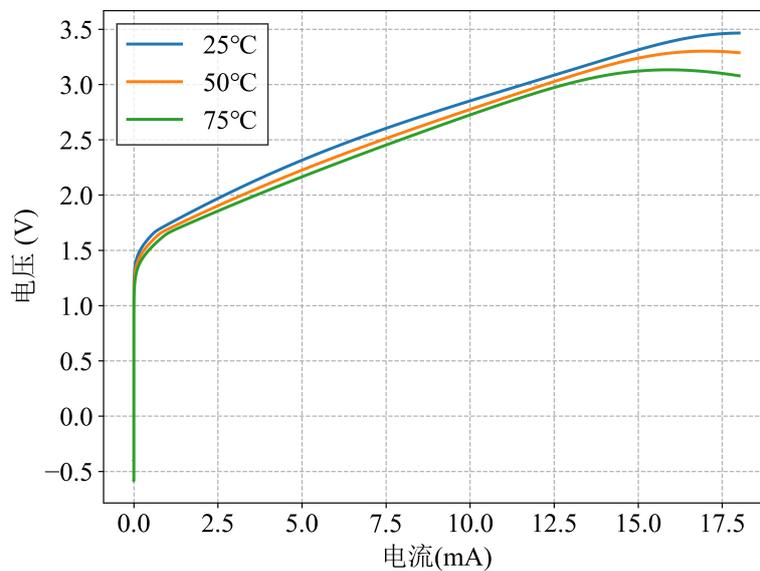


图 18: VCSEL输入I-V关系

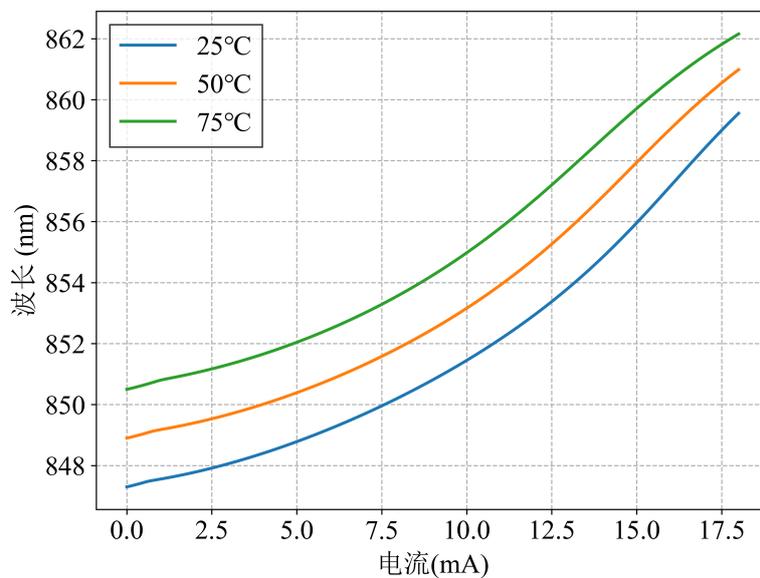


图 19: VCSEL波长变化

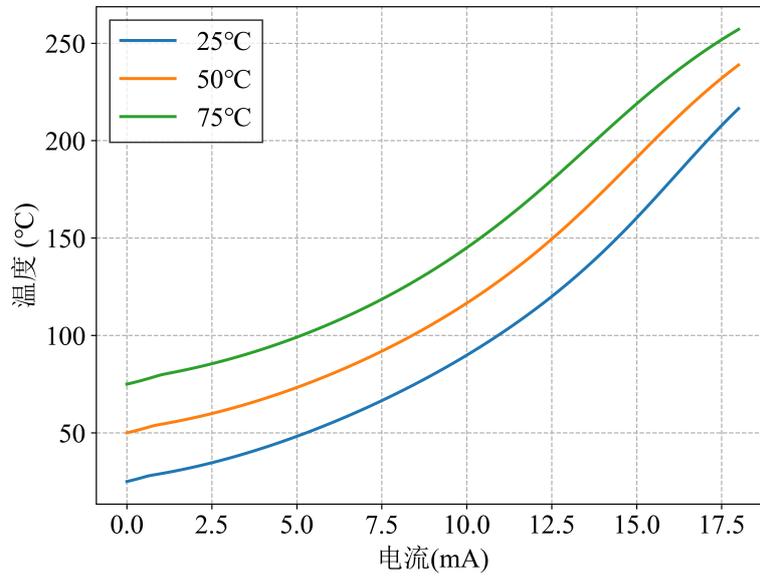


图 20: VCSEL温度变化

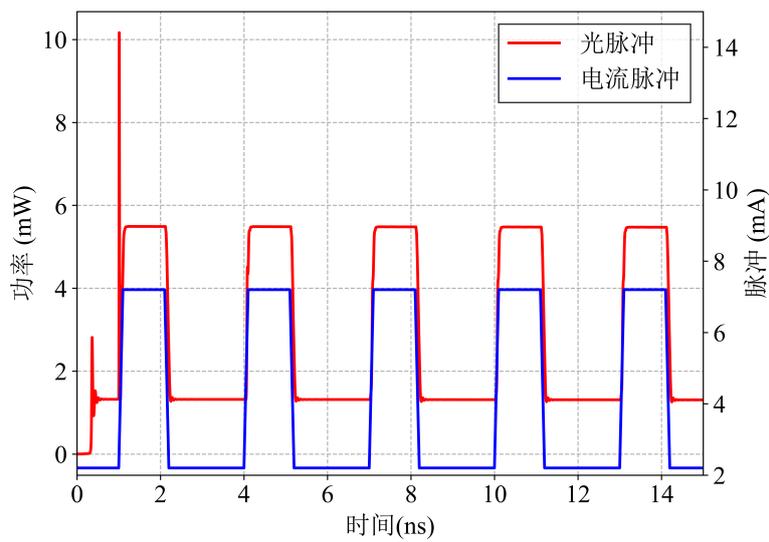


图 21: VCSEL脉冲响应仿真结果

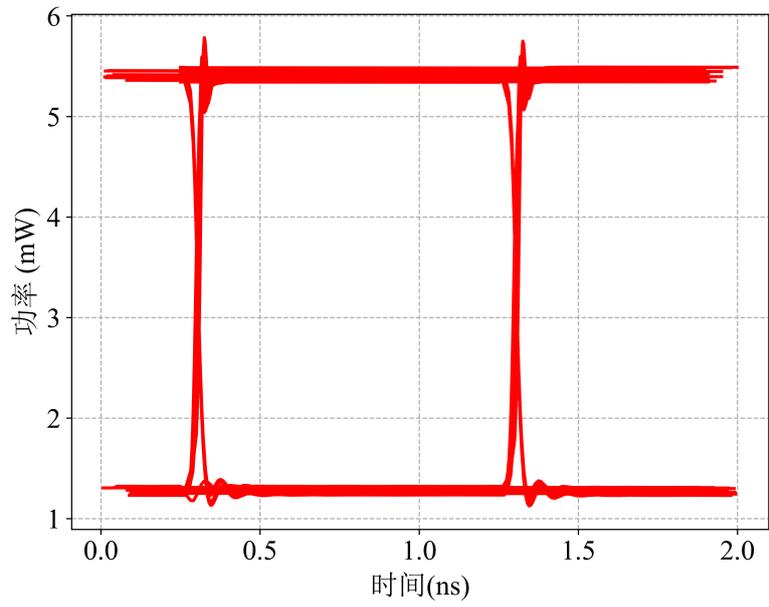


图 22: VCSEL眼图仿真结果

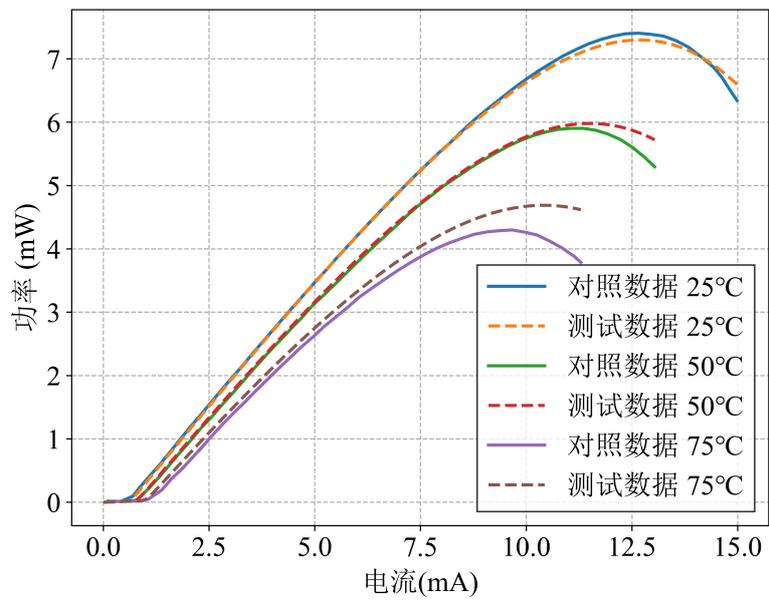


图 23: VCSEL直流仿真结果对比

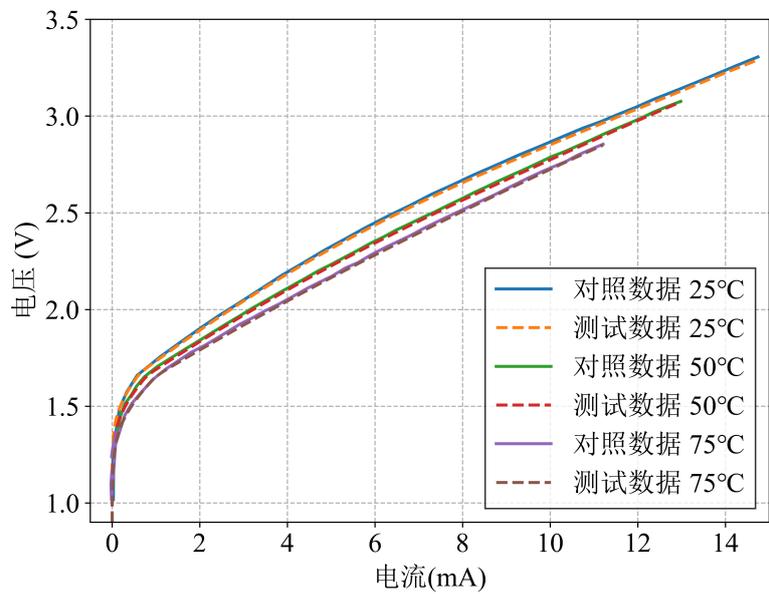


图 24: VCSEL输入I-V关系对比

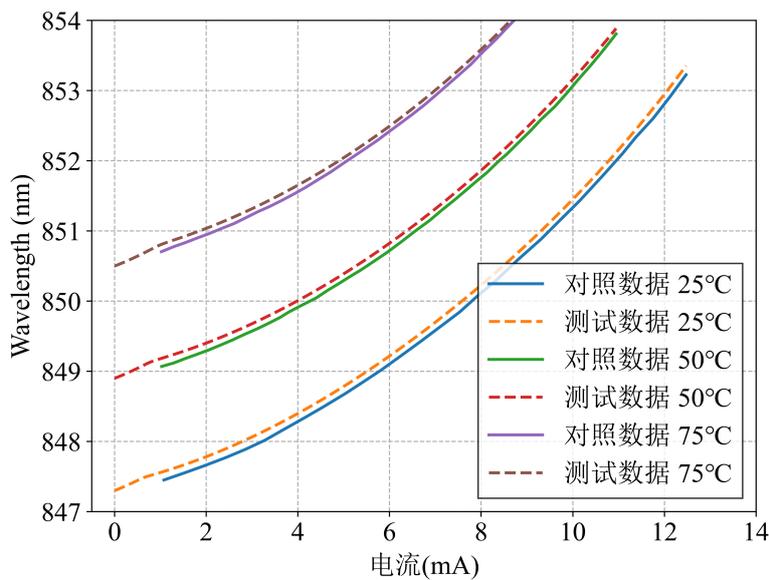


图 25: VCSEL波长变化对比

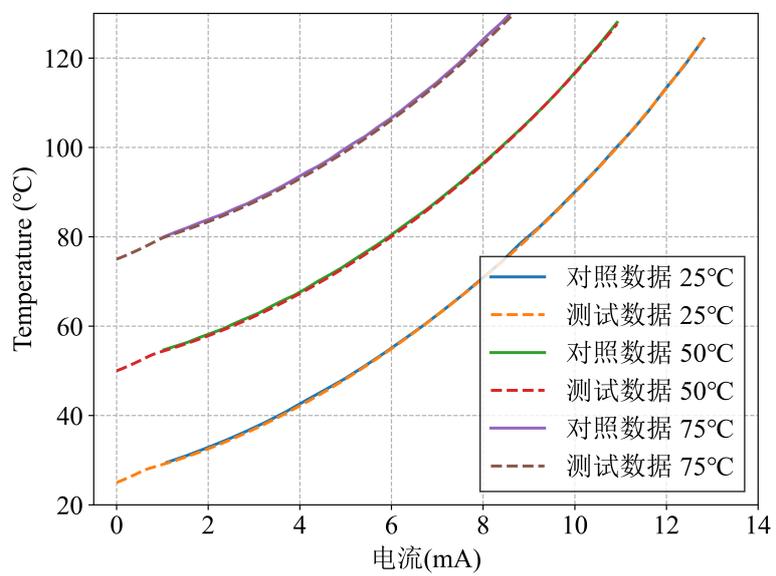
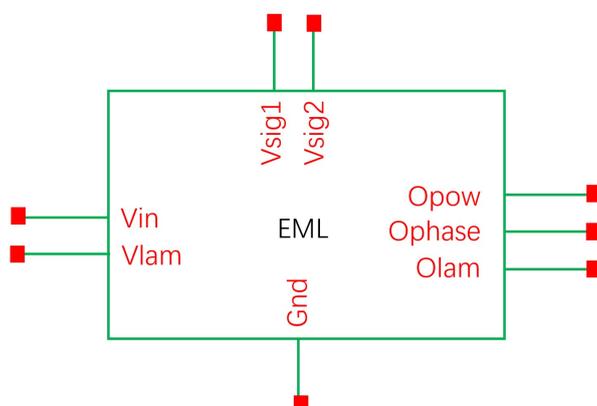


图 26: VCSEL温度变化对比

3.5 电调制激光器

模型样式



端口

	端口名称	描述
电学端口	Vin	电流输入
	Vlam	波长控制
	Vsig1	信号输入1
	Vsig2	信号输入2
光学端口	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出
接地	Gnd	接地

参数

参数	单位	值域	典型值
L 谐振腔长度	m	$[0, \infty)$	$3e-4$
W 谐振腔宽度	m	$[0, \infty)$	$1.5e-6$
D 谐振腔高度	m	$[0, \infty)$	$2e-7$
GAM 光限制因子		$[0, 1)$	0.3
T 陷阱辅助复合寿命	s	$[0, \infty)$	$1e-8$
BEATsp 自发辐射系数		$[0, \infty)$	$5e-5$

参数	单位	值域	典型值
ID 有源区材料标志	不适用	[0,1]	0
G0 增益系数	m^{-1}	$[0,\infty)$	2.5e4
Ntr 透明载流子浓度	m^{-3}	$[0,\infty)$	1e24
EPS 增益压缩因子	m^3	$[0,\infty)$	6e-23
B 辐射复合系数	$m^3 \cdot s^{-1}$	$[0,\infty)$	1e-16
A 俄歇复合系数	$m^6 \cdot s^{-1}$	$[0,\infty)$	7.5e-41
Rl 端面折射率		[0,1)	1e-8
ALFA0 有源区内部损耗	m^{-1}	$[0,\infty)$	5000
Q1 光子寿命参数1		$[0,\infty)$	1.9998
Q2 光子寿命参数2	m	$[0,\infty)$	1.4391e-4
Rat 调整参数	$m^3 \cdot s^{-1}$	$[0,\infty)$	1
Ng 群折射率		$[0,\infty)$	3.6
N0 平衡载流子浓度	m^{-3}	$[0,\infty)$	6.5e13
Vbi 内建势垒	V	$[0,\infty)$	1.13
EIT 理想因子		$[0,\infty)$	2
Rs 寄生串联电阻	Ω	$[0,\infty)$	1e-5
Cp 寄生并联电容	F	$[0,\infty)$	0
Rd 寄生泄漏电阻	Ω	$[0,\infty)$	1e15
Csc0 零偏结电容	F	$[0,\infty)$	0
Gam_c 端面损耗	m^{-1}	$(-\infty,\infty)$	0

参数	单位	值域	典型值
tau_L 载流子寿命精度		[1,∞)	6
num_carriler 载流子浓度拟合次数		[1,∞)	2
num_voltage 电压拟合次数		[1,∞)	6
tau_file 寿命数据文件位置	不适用		
gamma_file 损耗数据文件位置	不适用		
alpha_file 啁啾数据文件位置	不适用		

理论

该模型库中的电吸收调制器由一个DFB激光器模型和一个电吸收调制器模型组合而成，相应模型的建模方法及输入文件的格式请参考对应章节。

4 一般光源

4.1 普通光源

模型样式

功率-相位-波长输入：



幅值-相位-波长输入：



实部-虚部-波长输入：



端口

功率-相位-波长输入：

	端口名称	描述
电学端口	Vpow	功率输入
	Vphase	相位输入
	Vlam	波长输入
光学端口	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出

幅值-相位-波长输入：

	端口名称	描述
电学端口	Vmag	幅值输入
	Vphase	相位输入
	Vlam	波长输入
光学端口	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出

实部-虚部-波长输入：

	端口名称	描述
电学端口	Vreal	实部控制
	Vimag	虚部控制
	Vlam	波长控制
光学端口	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出

参数

参数	单位	值域	典型值
GainCoeff 增益系数		$[0, \infty)$	1
PhaseCoeff 相位偏移		$(-360, 360)$	0

理论

该组模型用于以输入电信号的数值生成对应的光信号。增益系数会在获得光信号后乘算至功率上，相位偏移将在最后加到相位值中。

4.2 LED

模型样式



端口

	端口名称	描述
电学端口	Vcurr	电流输入
	Vlam	波长控制
光学端口	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出

参数

参数	单位	值域	典型值
eta 注入系数		$(-\infty, \infty)$	1

理论

LED的光输出由下述公式决定：

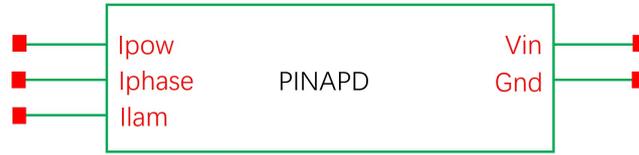
$$P = \eta h f \frac{I_{in}}{q} \quad (105)$$

上式中， η 为注入系数， I_{in} 为输入端口的电流。

5 光电探测器

5.1 PIN雪崩光电探测器

模型样式



端口

	端口名称	描述
电学端口	Vin	偏压控制
光学端口	Ipow	功率输入
	Iphase	相位输入
	Ilam	波长输入
接地	Gnd	接地

参数

参数	单位	值域	典型值
Idi 照射面标志	不适用	[0,1]	1
A 照射面积	m ²	(0,∞)	1.2e-8
Wn N区宽度	m	(0,∞)	2e-6
Wi I区宽度	m	(0,∞)	4.2e-6
Wp P区宽度	m	(0,∞)	2e-6
R 入射面反射率		(0,1)	0.35
ALFn N区吸收系数	m ⁻¹	(0,∞)	0.01
ALFi I区吸收系数	m ⁻¹	(0,∞)	3000
ALFp P区吸收系数	m ⁻¹	(0,∞)	3000

参数	单位	值域	典型值
Vbi 内建势垒	V	(0,∞)	0.8
Nin N区本征载流子浓度	m^{-3}	(0,∞)	3.3e12
Nip P区本征载流子浓度	m^{-3}	(0,∞)	7.3e17
Nd N区净施主浓度	m^{-3}	(0,∞)	5e24
Na P区净受主浓度	m^{-3}	(0,∞)	5e24
Un I区电子迁移率	$m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$	(0,∞)	1.05
Vsn I区电子饱和漂移速度	$m \cdot s^{-1}$	(0,∞)	1e5
Fth 阈值电场	$V \cdot m^{-1}$	(0,∞)	3.5e5
Up I区空穴迁移率	$m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$	(0,∞)	0.03
Vsp I区空穴饱和漂移速度	$m \cdot s^{-1}$	(0,∞)	1e5
Tp N区空穴寿命	s	(0,∞)	1e-9
Tn P区电子寿命	s	(0,∞)	2e-10
Tnr I区电子复合寿命	s	(0,∞)	2e-10
Dp N区空穴扩散系数	$m^3 \cdot s^{-1}$	(0,∞)	5.2e-4
Dn P区电子扩散系数	$m^2 \cdot s^{-1}$	(0,∞)	260e-4
An 电子碰撞离化率参数1	m^{-1}	[0,∞)	5.13e9
Bn 电子碰撞离化率参数2	$V \cdot m^{-1}$	(-∞,∞)	1.95e8
Cn 电子碰撞离化率参数3		(-∞,∞)	1
Ap 空穴碰撞离化率参数1	m^{-1}	[0,∞)	7.3e9
Bp 空穴碰撞离化率参数2	$V \cdot m^{-1}$	(-∞,∞)	2.2e8

参数	单位	值域	典型值
Cp 空穴碰撞离化率参数3		$(-\infty, \infty)$	1
EPSs I区相对介电常数		$(0, \infty)$	12
Eg 禁带宽度	eV	$(0, \infty)$	0.75
Mc 约化电子质量		$(0, \infty)$	0.041
GAM 隧穿漏电流参数		$(0, \infty)$	1.1
Rd 寄生漏电阻	Ω	$(0, \infty)$	1e10
Cs 寄生电容	F	$(0, \infty)$	1e-12
Rs 寄生串联电阻	Ω	$[0, \infty)$	5
Cno 归一化参数		$(0, \infty)$	1e-12
Rgnd 接地电阻	Ω	$[0, \infty)$	50

理论

该模型根据^[1]中的等效电路模型搭建，采用典型的PIN三层结构对探测器进行分析。该模型采用过剩载流子速率方程。对于反偏PIN结构，有如下速率方程：

$$\frac{dN_p}{dt} = G_n - \frac{N_p}{\tau_n} - \frac{I_n}{q} \quad (106)$$

$$\frac{dP_n}{dt} = G_p - \frac{P_n}{\tau_p} - \frac{I_p}{q} \quad (107)$$

$$\frac{dN_i}{dt} = G_i + v_n \zeta_n N_i + v_p \zeta_p P_i - \frac{N_i}{\tau_{nr}} - \frac{N_i}{\tau_{nt}} + \frac{I_n}{q} \quad (108)$$

$$\frac{dP_i}{dt} = G_i + v_n \zeta_n N_i + v_p \zeta_p P_i - \frac{P_i}{\tau_{pr}} - \frac{P_i}{\tau_{pt}} + \frac{I_p}{q} \quad (109)$$

上述公式中，(106)代表了P区电子浓度，(107)代表了N区空穴浓度，(108)代表了I区电子浓度，(109)代表了I区空穴浓度。其中， P_n (N_p) 代表了N(P)区过剩空穴（电子）总数， N_i (P_i) 为I区过剩电子（空穴）总数， τ_p (τ_n) 为N(P)区空穴（电子）寿命， τ_{nr} (τ_{pr}) 为I区电子（空穴）复合寿命， τ_{nt} (τ_{pt}) 为I区电子（空穴）漂移时间， G_p (G_n) 为入射光在N(P)区的电子-空穴对产生率（单位时间产生的电子-空穴对总数）， G_i 为入射光在I区的电子-空穴对产生率， I_p (I_n) 为N(P)区少数载流子空穴（电子）扩散电流， v_n (v_p) 为I区电

子（空穴）漂移速度， ζ_n (ζ_p) 为I区电子（空穴）碰撞离化率，即一个电子（空穴）在单位长度内碰撞离化产生的电子-空穴对数。

对I区采用电中性条件，有：

$$N_i = P_i \quad (110)$$

使用(110)对(108)和(109)进行简化，可得：

$$\frac{dN_i}{dt} = G_i + (v_n \zeta_n + v_p \zeta_p) N_i - \frac{N_i}{\tau_{nr}} - \frac{N_i}{\tau_{nt}} + \frac{I_n}{q} \quad (111)$$

各区域的电子-空穴对产生率由下式给出：

$$G_p = \frac{P_{in}(1-R)}{h\nu} [1 - \exp(-\alpha_n \cdot W_n)] \quad (112)$$

$$G_n = \frac{P_{in}(1-R)}{h\nu \cdot \exp(\alpha_n W_n + \alpha_i W_i)} [1 - \exp(-\alpha_p \cdot W_p)] \quad (113)$$

$$G_i = \frac{P_{in}(1-R)}{h\nu \cdot \exp(\alpha_n W_n)} [1 - \exp(-\alpha_i \cdot W_i)] \quad (114)$$

I区电子（空穴）漂移时间由下式给出：

$$\tau_{nt} = \frac{W_i}{v_n} \quad (115)$$

$$\tau_{pt} = \frac{W_i}{v_p} \quad (116)$$

上述公式中， P_{in} 为入射光功率， R 为N区端面反射率， $h\nu$ 为光子能量， α_n 、 α_i 、 α_p 分别为N、I、P区光功率吸收系数， W_n 、 W_i 、 W_p 分别为N、I、P区的宽度。

对于GaAs、InGaAs、InP、InGaAsP等III-V族材料，I区电子（空穴）漂移速度可采用下面的形式：

$$v_n(F) = \frac{\mu_n F + v_{sn}(F/F_{th})^4}{1 + (F/F_{th})^4} \quad (117)$$

$$v_p(F) = \frac{\mu_p F}{1 + \mu_p F/v_{sp}} \quad (118)$$

F 为I区电场，由下式给出：

$$F = \frac{V_j + V_{BI}}{W_i} \quad (119)$$

式中， V_j 为外加偏压， V_{BI} 为二极管内建势， μ_n (μ_p) 为I区电子（空穴）迁移率， v_{sn} (v_{sp}) 为I区电子（空穴）饱和漂移速度。

I区电子（空穴）碰撞离化率的经验公式如下所示：

$$\zeta_n(F) = a_n \exp[-(b_n/F)^{c_n}] \quad (120)$$

$$\zeta_p(F) = a_p \exp[-(b_p/F)^{c_p}] \quad (121)$$

其中， a_n 、 b_n 、 c_n 、 a_p 、 b_p 、 c_p 均为经验常数。

在此基础上，可以对速率方程进行处理以构造电路模型。引入归一化常数 C_{no} ，并令：

$$V_p = \frac{qP_n}{C_{no}} \quad (122)$$

$$V_n = \frac{qN_p}{C_{no}} \quad (123)$$

$$V_i = \frac{qN_i}{C_{no}} \quad (124)$$

对方程(106), (107)以及(111)进行整理, 可得:

$$I_{op} = \frac{P_{in}}{V_{op}} = C_{no} \frac{dV_p}{dt} + \frac{V_p}{R_p} + I_p \quad (125)$$

$$I_{on} = \frac{P_{in}}{V_{on}} = C_{no} \frac{dV_n}{dt} + \frac{V_n}{R_n} + I_n \quad (126)$$

$$I_{oi} = \frac{P_{in}}{V_{oi}} = C_{no} \frac{dV_i}{dt} + \frac{V_i}{R_{nr}} + \frac{V_i}{R_{nt}} - I_a - I_n \quad (127)$$

式中,

$$V_{op} = \frac{h\nu}{q(1-R)[1-\exp(-\alpha_n W_n)]} \quad (128)$$

$$V_{on} = \frac{h\nu \exp(\alpha_n W_n + \alpha_i W_i)}{q(1-R)[1-\exp(-\alpha_p W_p)]} \quad (129)$$

$$V_{oi} = \frac{h\nu \exp(\alpha_n W_n)}{q(1-R)[1-\exp(-\alpha_i W_i)]} \quad (130)$$

$$R_p = \frac{\tau_p}{C_{no}} \quad (131)$$

$$R_n = \frac{\tau_n}{C_{no}} \quad (132)$$

$$R_{nt} = \frac{\tau_{nt}}{C_{no}} \quad (133)$$

$$R_{nr} = \frac{\tau_{nr}}{C_{no}} \quad (134)$$

$$I_a = C_{no} V_i (v_n \zeta_n + v_p \zeta_p) \quad (135)$$

至此, 除了N(P)区少数载流子空穴(电子)扩散电流外, 速率方程中的其他项均以写作等效电路的形式。对于扩散电流, 需要通过求少数载流子的稳态连续性方程的解来确定。对于N区空穴, 稳态连续性方程为

$$D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} + G'_p = 0 \quad (136)$$

式中, D_p 为N区空穴扩散系数, 由下式表达:

$$D_p = \frac{L_p^2}{\tau_p} \quad (137)$$

L_p 为空穴的扩散长度, p_n 为空穴密度, p_{n0} 为平衡时空穴密度, 由下式给出:

$$p_{n0} = \frac{n_n^2}{N_D} \quad (138)$$

n_n 、 N_D 分别为N区本征载流子密度和净施主密度。式(136)中的增益项为

$$G'_p = \frac{P_{in}(1-R)\alpha_n}{A \cdot h\nu} \exp(-\alpha_n x) \quad (139)$$

考虑以下的边界条件:

$$\begin{aligned} x = 0 : p_n &= p_n(0) \\ x = W_n : p_n &= 0 \end{aligned} \quad (140)$$

基于上述条件求解(136)，得到以下的解：

$$p_n = p_{n0} + \frac{1}{\text{sh}(W_n/L_p)} \left\{ [p_n(0) - p_{n0} - C_1] \text{sh}\left(\frac{W_n - x}{L_p}\right) - [p_{n0} + C_1 \exp(-\alpha_n W_n)] \text{sh}\left(\frac{x}{L_p}\right) \right\} + C_1 \exp(-\alpha_n x) \quad (141)$$

上式中 C_1 的表达式如下：

$$C_1 = \frac{P_{in}(1-R)}{A \cdot h\nu} \cdot \frac{\alpha_n L_p^2}{D_p (1 - \alpha_n^2 L_p^2)} \quad (142)$$

在此基础上，过剩空穴总数由下式给出：

$$P_n = A \int_0^{W_n} (p_n - p_{n0}) dx \quad (143)$$

扩散电流由下式给出：

$$I_p = -qAD_p \left. \frac{dp_n}{dx} \right|_{x=W_n} \quad (144)$$

将(141)和(142)带入(143)和(144)，化简可得到 I_p 的表达式：

$$I_p = \frac{V_p}{R_{pd}} + \beta_p P_{in} + I_{p0} \quad (145)$$

式中，

$$R_{pd} = R_p [\text{ch}(W_n/L_p) - 1] \quad (146)$$

$$I_{p0} = \frac{qP_{n0}L_p [\text{ch}(W_n/L_p) + 1]}{W_n \tau_p \text{sh}(W_n/L_p)} \quad (147)$$

$$P_{n0} = A \int_0^{W_n} p_{n0} dx = AW_n p_{n0} \quad (148)$$

$$\beta_p = \frac{q(1-R)}{h\nu} \cdot \frac{\alpha_n L_p^2}{(1 - \alpha_n^2 L_p^2)} \cdot \left\{ \frac{[\text{ch}(W_n/L_p) + 1] \exp(-\alpha_n W_n)}{L_p \text{sh}(W_n/L_p)} + \frac{\exp(-\alpha_n W_n) - 1}{\alpha_n L_p^2 [\text{ch}(W_n/L_p) - 1]} + \alpha_n \exp(-\alpha_n W_n) \right\} \quad (149)$$

对应的，对于P区电子，稳态连续性方程为

$$D_n \frac{d^2 n_p}{dx^2} - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} + G'_n = 0 \quad (150)$$

式中， D_n 为P区电子扩散系数，由下式表达：

$$D_n = \frac{L_n^2}{\tau_n} \quad (151)$$

L_n 为空穴的扩散长度， n_p 为空穴密度， n_{p0} 为平衡时空穴密度，由下式给出：

$$n_{p0} = \frac{n_p^2}{N_A} \quad (152)$$

n_p 、 N_A 分别为P区本征载流子密度和净受主密度。式(150)中的增益项为

$$G'_n = \frac{P_{in}(1-R)\alpha_p}{A \cdot h\nu \cdot \exp(\alpha_n W_n + \alpha_i W_i)} \exp(-\alpha_p x) \quad (153)$$

考虑以下的边界条件:

$$\begin{aligned} x = 0 : n_p &= 0 \\ x = W_p : n_p &= n_p(0) \end{aligned} \quad (154)$$

基于上述条件求解(150), 得到以下的解:

$$\begin{aligned} n_p = n_{p0} + \frac{1}{\text{sh}(W_p/L_n)} \{ [n_p(0) - n_{p0} - C_2 \exp(-\alpha_p W_p)] \cdot \text{sh}(x/L_n) - \\ (C_2 + n_{p0}) \text{sh}[(W_p - x)/L_n] \} + C_2 \exp(-\alpha_p x) \end{aligned} \quad (155)$$

上式中 C_2 的表达式如下:

$$C_2 = \frac{P_{in}(1-R) \exp(-\alpha_n W_n - \alpha_i W_i)}{A \cdot h\nu} \cdot \frac{\alpha_p L_n^2}{D_n (1 - \alpha_p^2 L_n^2)} \quad (156)$$

在此基础上, 过剩电子总数由下式给出:

$$N_p = A \int_0^{w_p} (n_p - n_{p0}) dx \quad (157)$$

扩散电流由下式给出:

$$I_n = -qAD_n \left. \frac{dn_p}{dx} \right|_{x=0} \quad (158)$$

将(155)和(156)带入(157)和(158), 化简可得到 I_n 的表达式:

$$I_n = \frac{V_n}{R_{nd}} + \beta_n P_{in} + I_{n0} \quad (159)$$

式中

$$R_{nd} = R_n [\text{ch}(W_p/L_n) - 1] \quad (160)$$

$$I_{n0} = \frac{qN_{p0}L_n [\text{ch}(W_p/L_n) + 1]}{W_p \tau_n \text{sh}(W_p/L_n)} \quad (161)$$

$$N_{p0} = A \int_0^{W_p} n_{p0} dx = AW_p n_{p0} \quad (162)$$

$$\begin{aligned} \beta_n = \frac{q(1-R) \exp[-(\alpha_n W_n + \alpha_i W_i)]}{h\nu} \cdot \frac{\alpha_p L_n^2}{(1 - \alpha_p^2 L_n^2)} \cdot \\ \left\{ \frac{\text{ch}(W_p/L_n) + 1}{L_n \text{sh}(W_p/L_n)} + \frac{\exp(-\alpha_p W_p) - 1}{\alpha_p L_n^2 [\text{ch}(W_p/L_n) - 1]} - \alpha_p \right\} \end{aligned} \quad (163)$$

考虑流过N-I界面的电流, 即PIN-APD的端电流, 有

$$I_J = I_p + I_i + I_d + C_T \frac{dV_j}{dt} + \frac{V_j}{R_d} \quad (164)$$

式中 $C_T = C_s + C_J$, C_s 为寄生电容, $C_J = \epsilon_0 \epsilon_s A / W_i$, ϵ_s 为材料相对介电常数, A 为器件面积, V_j 为结电压, I_d 为隧穿电流与其它寄生漏电流之和, 可写为

$$I_d = \frac{\Theta_1 A V_j (V_j + V_{bi})}{W_i} \exp\left(-\frac{\Theta_2 W_i}{V_j + V_{bi}}\right) + \frac{V_j}{R_d} \quad (165)$$

上式中 Θ_1 和 Θ_2 的表达式如下:

$$\Theta_1 = \frac{q^3 \sqrt{2m_n/E_g}}{4\pi^2 \hbar^2} \quad (166)$$

$$\Theta_2 = \frac{\gamma \sqrt{m_n E_g}}{q\hbar} \quad (167)$$

式(165)中第一项为隧穿电流, 当反偏压较高时起主要作用; 第二项为寄生漏电流。 m_n 为电子的有效质量, γ 为一个与隧穿势垒的形状有关的参数, E_g 为带隙, R_d 为寄生电阻。

示例

使用的原理图如图27所示。使用电压源V3控制PINAPD的端电压，使用电压源V0和V2控制理想光源的输出波长和输出相位。使用开关S0控制理想光源的输出功率，即由V1产生的恒定信号、V4产生的脉冲信号或由随机信号发生器I7产生的随机码信号。测量Vin端口的电流即可获得该探测器的工作情况。使用该原理图进行直流仿真、脉冲仿真和眼图，可得到图28-30中的结果。

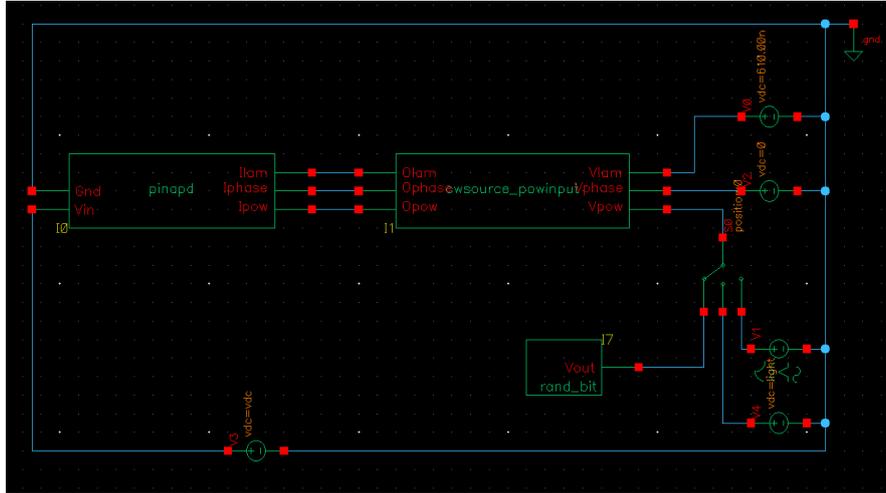


图 27: PINAPD仿真原理图

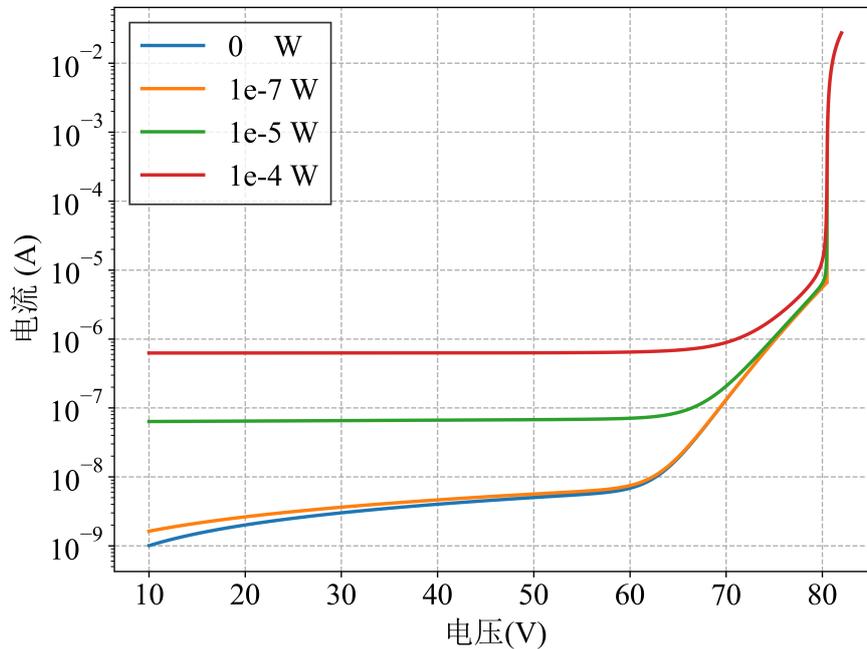


图 28: PINAPD直流仿真结果

对比

我们使用文献^[1]中的数据，对暗电流结果进行了对比，结果如图31所示。

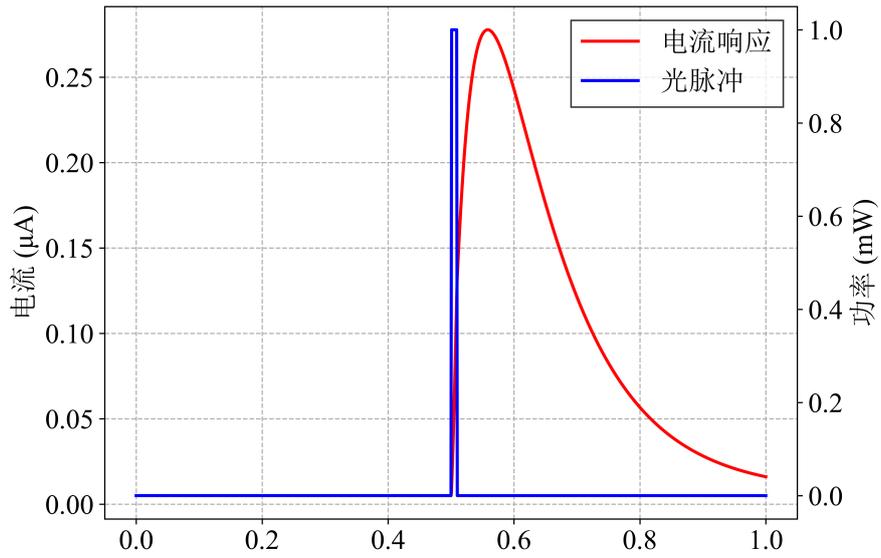


图 29: PINAPD脉冲响应仿真结果

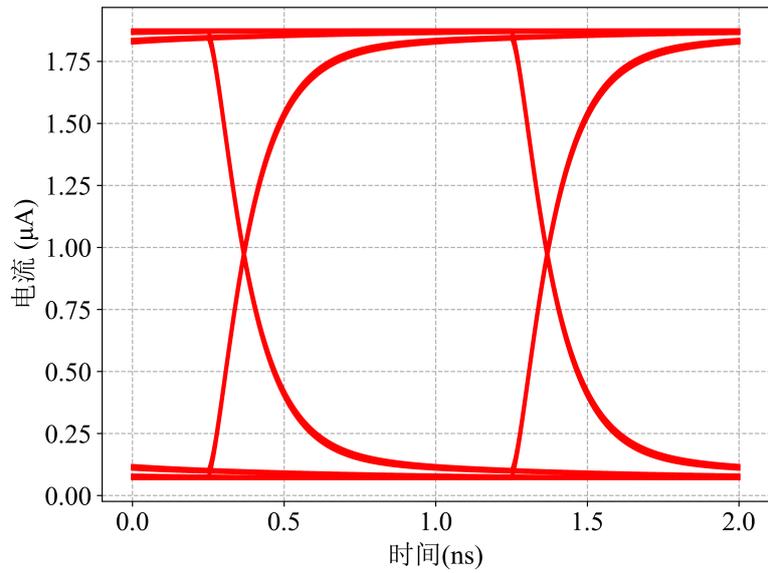


图 30: PINAPD眼图仿真结果

参考文献

- [1] 陈维友, 杨树人, 刘式壝. 光电子器件模型与OEIC模拟[M]. 国防工业出版社, 2001.

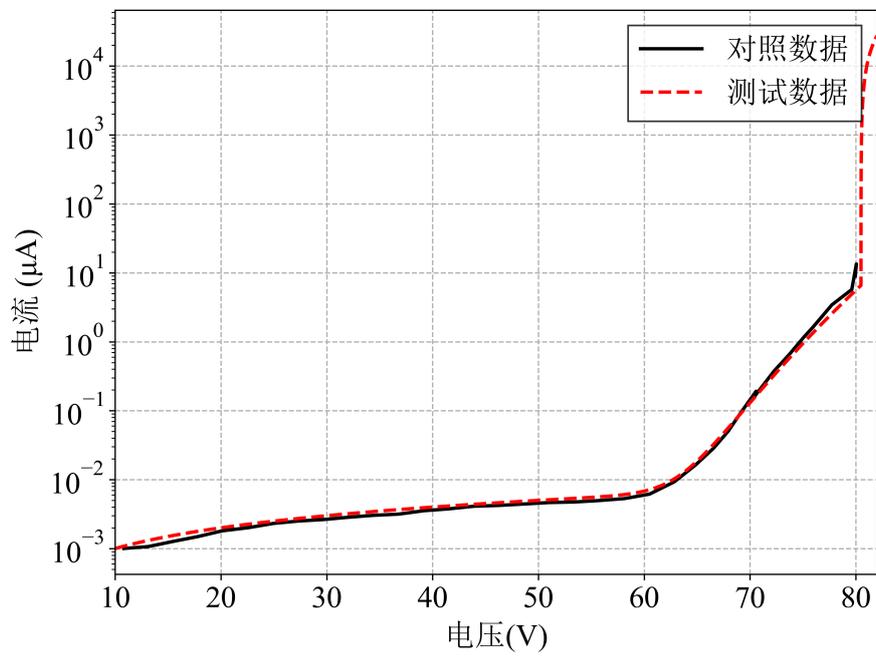
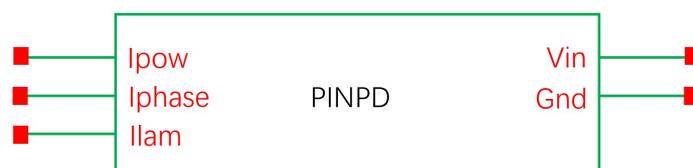


图 31: PINAPD暗电流结果对比

5.2 PIN光电探测器

模型样式



端口

	端口名称	描述
电学端口	Vin	偏压控制
光学端口	Ipow	功率输入
	Iphase	相位输入
	I lam	波长输入
接地	Gnd	接地

参数

参数	单位	值域	典型值
Idi 照射面标志	不适用	[0,1]	1
A 照射面积	m ²	(0,∞)	1.2e-8
Wn N区宽度	m	(0,∞)	2e-6
Wi I区宽度	m	(0,∞)	4.2e-6
Wp P区宽度	m	(0,∞)	2e-6
R 入射面反射率		(0,1)	0.35
ALFn N区吸收系数	m ⁻¹	(0,∞)	0.01
ALFi I区吸收系数	m ⁻¹	(0,∞)	3000
ALFp P区吸收系数	m ⁻¹	(0,∞)	3000
Vbi 内建势垒	V	(0,∞)	0.8

参数	单位	值域	典型值
Nin N区本征载流子浓度	m^{-3}	(0,∞)	3.3e12
Nip P区本征载流子浓度	m^{-3}	(0,∞)	7.3e17
Nd N区净施主浓度	m^{-3}	(0,∞)	5e24
Na P区净受主浓度	m^{-3}	(0,∞)	5e24
Un I区电子迁移率	$m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$	(0,∞)	1.05
Vsn I区电子饱和漂移速度	$m \cdot s^{-1}$	(0,∞)	1e5
Fth 阈值电场	$V \cdot m^{-1}$	(0,∞)	3.5e5
Up I区空穴迁移率	$m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$	(0,∞)	0.03
Vsp I区空穴饱和漂移速度	$m \cdot s^{-1}$	(0,∞)	1e5
Tp N区空穴寿命	s	(0,∞)	1e-9
Tn P区电子寿命	s	(0,∞)	2e-10
Tnr I区电子复合寿命	s	(0,∞)	2e-10
Dp N区空穴扩散系数	$m^2 \cdot s^{-1}$	(0,∞)	5.2e-4
Dn P区电子扩散系数	$m^2 \cdot s^{-1}$	(0,∞)	260e-4
EPSs I区相对介电常数		(0,∞)	12
Eg 禁带宽度	eV	(0,∞)	0.75
Mc 约化电子质量		(0,∞)	0.041
GAM 隧穿漏电流参数		(0,∞)	1.1
Rd 寄生漏电阻	Ω	(0,∞)	1e10
Cs 寄生电容	F	(0,∞)	1e-12

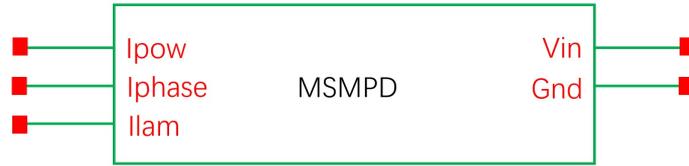
参数	单位	值域	典型值
Rs 寄生串联电阻	Ω	$[0, \infty)$	5
Cno 归一化参数		$(0, \infty)$	1e-12
Rgnd 接地电阻	Ω	$[0, \infty)$	50

理论

本模型库中的PINPD模型由PINAPD模型简化而来。该模型去除了PINAPD的碰撞离子化率，即公式(120)和(121)。详细理论请参照PINAPD的相关内容。

5.3 MSM光电探测器

模型样式



端口

	端口名称	描述
电学端口	Vin	偏压控制
光学端口	Ipow	功率输入
	Iphase	相位输入
	Ilam	波长输入
接地	Gnd	接地

参数

参数	单位	值域	典型值
Lg 电极间宽度	m	(0,∞)	3e-6
Se 有效受光面积	m ²	(0,∞)	3.726e-9
Aa 阳极面积	m ²	(0,∞)	2.757e-9
Ac 阴极面积	m ²	(0,∞)	3.114e-9
Cf 场衰减系数	m ² · V ⁻¹	(0,∞)	0.02
Cc 电容调整参数	m	[0,∞)	0.5
Cno 归一化参数		(0,∞)	1e-12
Ci 入射系数	m ⁻³ · s ⁻²	(0,∞)	0.38
EPSs 相对介电常数		(0,∞)	12.9
D 吸收区厚度	m	(0,∞)	6e-6

参数	单位	值域	典型值
ALFA 吸收系数	m^{-1}	$[0, \infty)$	1e10
Un 电子迁移率	$m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$	$(0, \infty)$	5500e-4
Up 空穴迁移率	$m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$	$(0, \infty)$	400e-4
Vns 电子饱和漂移速度	$m \cdot s^{-1}$	$(0, \infty)$	8.5e4
Vps 空穴饱和漂移速度	$m \cdot s^{-1}$	$(0, \infty)$	8.5e4
Fth 阈值电场	$V \cdot m^{-1}$	$(0, \infty)$	4.2e10
Tnr 电子复合寿命	s	$(0, \infty)$	2e-10
Tpr 空穴复合寿命	s	$(0, \infty)$	6.5e-10
Cm 电流调整参数	m^{-4}	$(0, \infty)$	10
Rdark 寄生漏电阻	Ω	$(0, \infty)$	9.1e9
Cp 寄生电容	F	$[0, \infty)$	1e-13
Rs 寄生串联电阻	Ω	$[0, \infty)$	5
Rgnd 接地电阻	Ω	$[0, \infty)$	50

理论

MSM光电探测器的模型参考了^[1]。该模型中吸收区内过剩电子和空穴的速率方程如下：

$$\frac{dN}{dt} = G - \frac{N}{\tau_{nt}} - \frac{N}{\tau_{nr}} \quad (168)$$

$$\frac{dP}{dt} = G - \frac{P}{\tau_{pt}} - \frac{P}{\tau_{pr}} \quad (169)$$

式中， $N(P)$ 为吸收区内过剩电子（空穴）总数， τ_{nt} （ τ_{pt} ）为电子（空穴）漂移渡越时间， τ_{nr} （ τ_{pr} ）为电子（空穴）复合寿命， G 为吸收区内单位时间产生的光生载流子数，表达式如下：

$$G = \frac{C_i P_{in} [1 - \exp(-\alpha D)]}{h\nu} \quad (170)$$

式中, P_{in} 为入射到探测器表面的总功率, C_i 为入射系数, $C_i P_{\text{in}}$ 为探测器的有效吸收功率, α 为光吸收系数, D 为吸收区深度, 通常为吸收层厚度, $h\nu$ 为光子能量。

引入归一化常数 C_{no} , 并令 $V_p = \frac{qP}{C_{\text{no}}}$, $V_n = \frac{qN}{C_{\text{no}}}$,对(168)和(169)进行整理, 可得

$$\frac{P_{\text{in}}}{R_0} = C_n \frac{dV_n}{dt} + \frac{V_n}{R_{\text{nt}}} + \frac{V_n}{R_{\text{nr}}} \quad (171)$$

$$\frac{P_{\text{in}}}{R_0} = C_p \frac{dV_p}{dt} + \frac{V_p}{R_{\text{pt}}} + \frac{V_p}{R_{\text{pr}}} \quad (172)$$

式中 $C_n = C_p = C_{\text{no}}$, 其他项如下:

$$R_0 = \frac{h\nu}{qC_i[1 - \exp(-\alpha D)]} \quad (173)$$

$$R_{\text{nt}} = \frac{\tau_{\text{nt}}}{C_{\text{no}}} \quad (174)$$

$$R_{\text{nr}} = \frac{\tau_{\text{nr}}}{C_{\text{no}}} \quad (175)$$

$$R_{\text{pt}} = \frac{\tau_{\text{pt}}}{C_{\text{no}}} \quad (176)$$

$$R_{\text{pr}} = \frac{\tau_{\text{pr}}}{C_{\text{no}}} \quad (177)$$

$$\tau_{\text{nt}} = \frac{L_g}{v_n} \quad (178)$$

$$\tau_{\text{pt}} = \frac{L_g}{v_p} \quad (179)$$

上述各式中, L_g 为两电极条之间的宽度, v_n (v_p) 为电子 (空穴) 漂移速度, 它们与电极间平均电场 F_g ($F_g = V_g/L_g$, V_g 为端电压) 的关系可写为

$$v_n(F_g) = \frac{\mu_n F_g + v_{\text{ns}}(F_g/F_{\text{th}})^4}{1 + (F_g/F_{\text{th}})^4} \quad (180)$$

$$v_p(F_g) = \frac{\mu_p F_g}{1 + \mu_p F_g/v_{\text{ps}}} \quad (181)$$

MSM探测器的输入端电流由下式表达:

$$I_{\text{op}} = G(t)V_g + C(t) \frac{dV_g}{dt} \quad (182)$$

式中, I_{op} 为调制器的端电流, $G(t)$ 和 $C(t)$ 的表达式如下:

$$G(t) = \frac{C_m q N v_n (C_f F_g) + C_m q P v_p (C_f F_g)}{V_g L_g} + G_{\text{dark}} \quad (183)$$

$$C(t) = C_T + C_p \quad (184)$$

其中 G_{dark} 为暗电导, C_p 为寄生电容, C_m 和 C_f 为引入的模型参数, C_T 及其附属求解表达式如下:

$$C_T = \frac{C_{\text{gc}}(t)C_{\text{ga}}(t)}{C_{\text{gc}}(t) + C_{\text{ga}}(t)} \quad (185)$$

$$C_{\text{ga}}(t) = C_c A_a \sqrt{\frac{qN(t - \tau_d) \varepsilon_0 \varepsilon_s}{S_e D V_g(t)}} \quad (186)$$

$$C_{gc}(t) = C_c A_c \sqrt{\frac{qP(t - \tau_d) \epsilon_0 \epsilon_s}{S_e D V_g(t)}} \quad (187)$$

式中， C_c 为这里引入的模型参数， A_a (A_c) 为阳 (阴) 电极面积， S_e 为有效受光面积， τ_d 为电极下空间电荷区形成时间。综合上述公式，整理可得：

$$I_{op} = I_n + I_p + \frac{V_g}{R_d} + (C_T + C_p) \frac{dV_g}{dt} \quad (188)$$

式中，

$$I_n = C_m C_{no} V_n v_n (C_f F_g) / L_g \quad (189)$$

$$I_p = C_m C_{no} V_p v_p (C_f F_g) / L_g \quad (190)$$

$$R_d = 1/G_{dark} \quad (191)$$

示例

使用的原理图如图32所示。使用电压源V3控制PINAPD的端电压，使用电压源V0和V2控制理想光源的输出波长和输出相位。使用开关S0控制理想光源的输出功率，即由V1产生的恒定信号、V4产生的脉冲信号或由随机信号发生器I4产生的随机码信号。测量Vin端口的电流即可获得该探测器的工作情况。使用该原理图进行直流仿真、脉冲仿真和眼图，可得到图33-35中的结果。

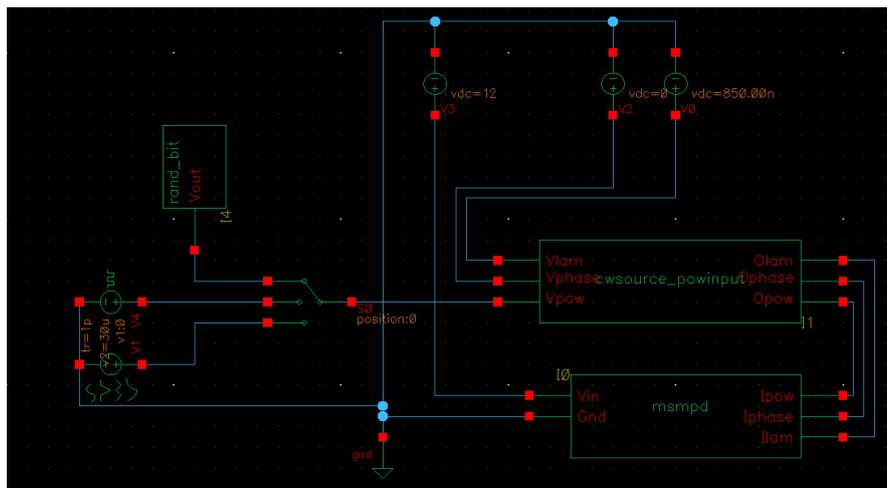


图 32: MSMPD仿真原理图

对比

我们使用文献^[1]中的数据，对光电流结果进行了对比，结果如图36所示。

参考文献

- [1] 陈维友, 杨树人, 刘式壝. 光电子器件模型与OEIC模拟[M]. 国防工业出版社, 2001.

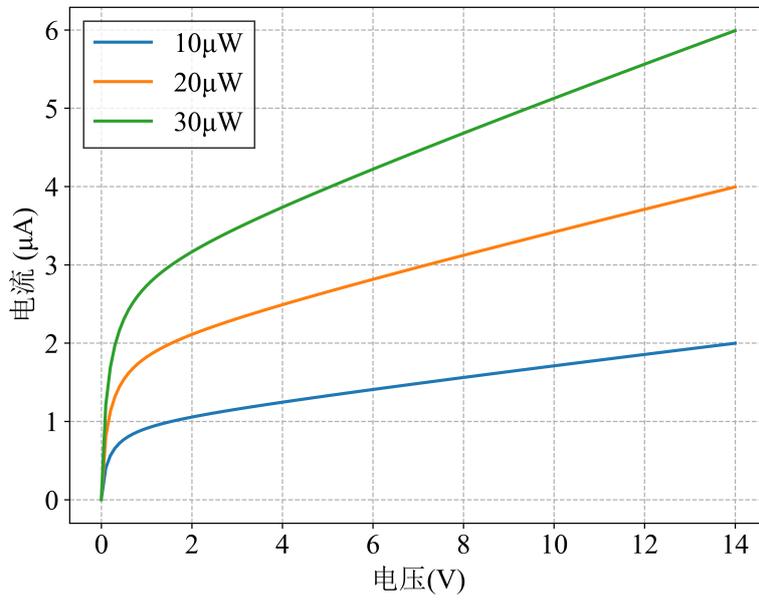


图 33: MSMPD直流仿真结果

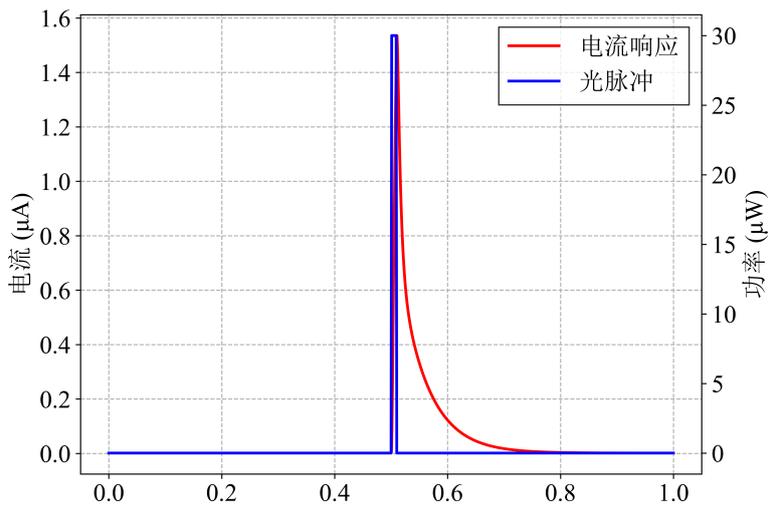


图 34: MSMPD脉冲响应仿真结果

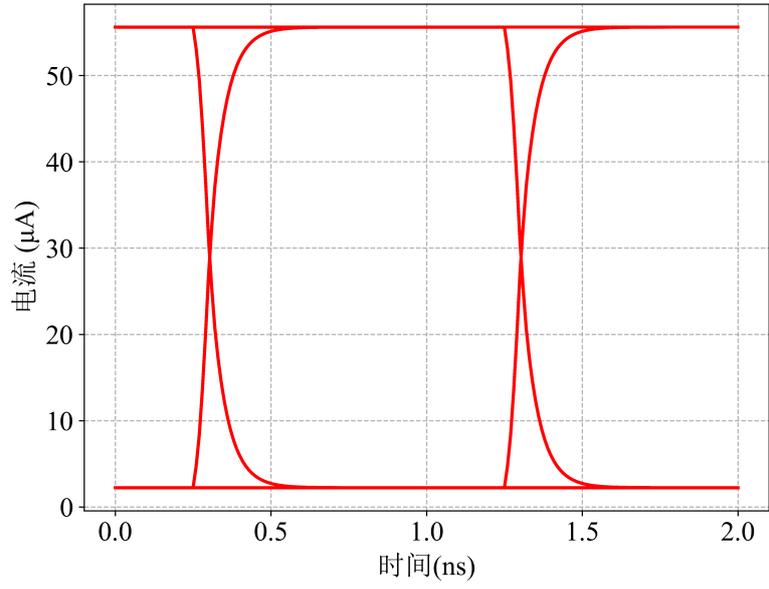


图 35: MSMPD眼图仿真结果

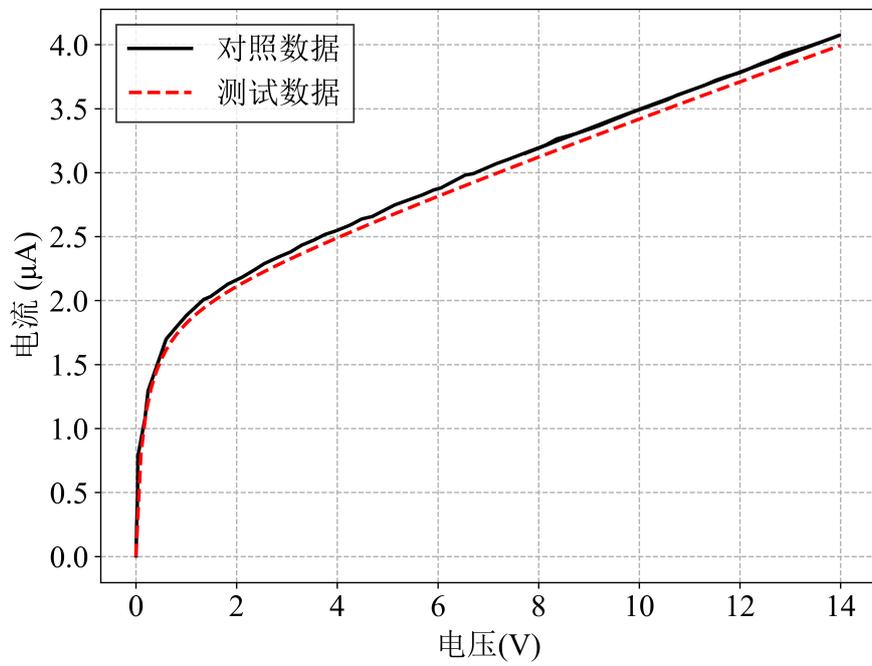
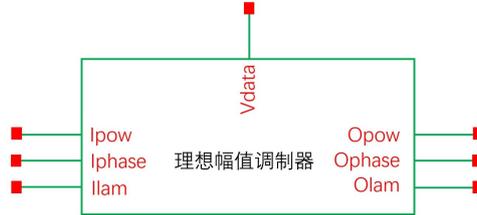


图 36: MSMPD光电流结果对比

6 光电调制器（除微环调制器外）

6.1 理想幅值调制器

模型样式



端口

	端口名称	描述
电学端口	Vdata	电信号输入
光学端口	Ipow	功率输入
	Iphase	相位输入
	Ilam	波长输入
	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出

参数

参数	单位	值域	典型值
m 调制系数		[0,1]	1

理论

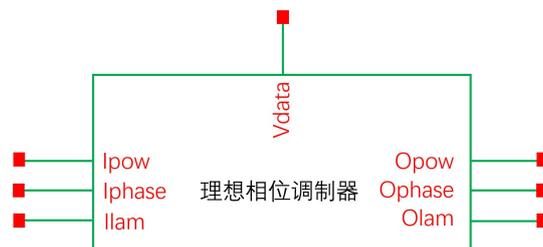
该模型为理想幅值调制器，其光功率输出如下：

$$P_{\text{out}}(t) = P_{\text{in}}(t) \cdot d(t) = P_{\text{in}}(t) \cdot ((1 - m) + m \cdot V_{\text{data}}) \quad (192)$$

式中 m 为调制系数， V_{data} 为随时间变化的电压信号。

6.2 理想相位调制器

模型样式



端口

	端口名称	描述
电学端口	Vdata	电信号输入
光学端口	Ipow	功率输入
	Iphase	相位输入
	Ilam	波长输入
	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出

参数

参数	单位	值域	典型值
dph 相位幅度		$(-\infty, \infty)$	180

理论

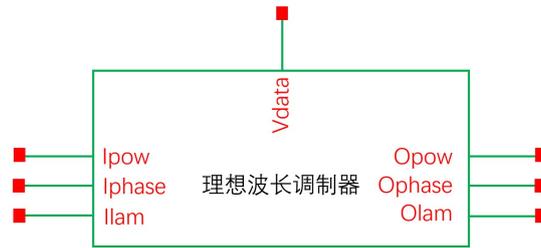
该模型为理想相位调制器，其幅值变化如下：

$$E_{\text{out}}(t) = E_{\text{in}}(t) \cdot \exp[j\Delta\varphi V_{\text{data}}(t)] \quad (193)$$

式中 $\Delta\varphi$ 为相位幅度，即信号电压为1V时相位的变化幅度， V_{data} 为随时间变化的电压信号。

6.3 理想频率调制器

模型样式



端口

	端口名称	描述
电学端口	Vdata	电信号输入
光学端口	Ipow	功率输入
	Iphase	相位输入
	Ilam	波长输入
	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出

参数

参数	单位	值域	典型值
df 频率幅度		$(-\infty, \infty)$	1e10

理论

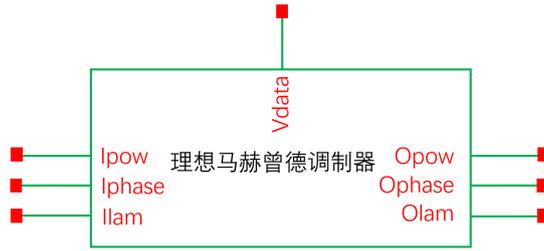
该模型为理想频率调制器，其频率变化如下：

$$f = f_0 + \Delta f(V_{\text{data}}(t) - 0.5) \quad (194)$$

式中 Δf 为频率幅度， V_{data} 为随时间变化的电压信号。

6.4 理想马赫曾德调制器

模型样式



端口

	端口名称	描述
电学端口	Vdata	电信号输入
光学端口	Ipow	功率输入
	Iphase	相位输入
	Ilam	波长输入
	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出

参数

参数	单位	值域	典型值
ext 消光比	dB	$[0, \infty)$	30
sym 对称系数		$[-1, 1)$	-1
Chirp 啁啾系数		-1, 1	1

理论

该模型为理想马赫曾德调制器，其光功率输出如下：

$$P_{\text{out}}(t) = P_{\text{in}}(t) \cdot d(t) = P_{\text{in}}(t) \cdot \cos^2[\Delta\Phi(t)] \quad (195)$$

式中，

$$\Delta\Phi = \frac{\pi}{2} \left(\frac{1}{2} - \text{ext} \cdot \left(V_{\text{data}} - \frac{1}{2} \right) \right) \quad (196)$$

$$\text{ext} = 1 - \frac{4}{\pi} \arctan \left(1 / \left(\sqrt{f_{\text{extinct}}} \right) \right) \quad (197)$$

式中， V_{data} 为随时间变化的电压信号。

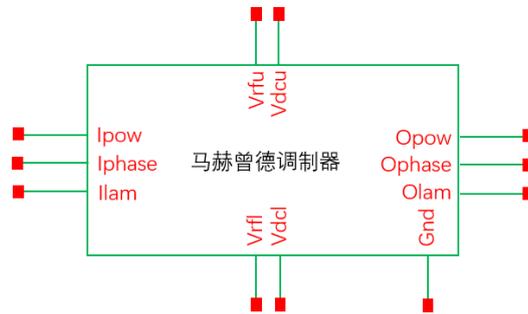
该调制器的光相位变化如下：

$$\phi = \phi_0 + \sigma \frac{1+k}{1-k} \Delta\Phi \quad (198)$$

式中， σ 为啁啾系数， k 为对称系数。

6.5 基本马赫曾德调制器

模型样式



端口

	端口名称	描述
电学端口	Vrfu	上臂电信号输入
	Vrfl	下臂电信号输入
	Vdcu	上臂偏压输入
	Vdcl	下臂偏压输入
光学端口	Ipow	功率输入
	Iphase	相位输入
	Ilam	波长输入
	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出
接地	Gnd	接地

参数

参数	单位	值域	典型值
VpiDC 偏压端口 π 相位变化所需电压	V	(0, ∞)	5
VpiRF 电信号输入端口 π 相位变化所需电压	V	(0, ∞)	5
insloss 内部损耗	dB	[0, ∞)	6
extratio 消光比		[0, ∞)	35
lowarmphase 下臂相位系数		-1,1	-1
dVdcdT VpiDC 对温度的一阶导数	V/ $^{\circ}$ C	($-\infty$, ∞)	0

参数	单位	值域	典型值
dVrfdT VpiRF对温度的一阶导数	V/°C	(-∞,∞)	0
reftem 参考温度	°C	(-273.15,∞)	25
directmod 占比算法控制		0,1	0

理论

该模型为标准的马赫曾德调制器模型，其基本光输出情况由下式给出：

$$E_{out}(t) = \frac{E_{in}(t)}{10^{(I_L/20)}} \cdot \left[\gamma_{up} \cdot \exp\left(\frac{j\pi V_{rfu}(t)}{V_{\pi RF} + (T - T_{ref}) \frac{dV_{\pi RF}}{dT}} + \frac{j\pi V_{dcu}}{V_{\pi DC} + (T - T_{ref}) \frac{dV_{\pi DC}}{dT}}\right) + \gamma_{down} \cdot \exp\left(\frac{j\pi V_{rfd}(t)}{V_{\pi RF} + (T - T_{ref}) \frac{dV_{\pi RF}}{dT}} + \frac{j\pi V_{dfd}}{V_{\pi DC} + (T - T_{ref}) \frac{dV_{\pi DC}}{dT}}\right) \right] \quad (199)$$

式中， I_L 为内部损耗， $V_{\pi RF}$ 和 $V_{\pi DC}$ 代表了电信号输入端口和偏压端口 π 相位变化所需电压， T_{ref} 为参考温度。

γ_{up} 和 γ_{down} 代表了上臂和下臂的占比，可通过直接法或平方法计算。

直接方法计算占比的公式如下：

$$\gamma_{up} = 0.5 + \frac{1}{2\sqrt{10^{e_r/10}}} \quad (200)$$

$$\gamma_{down} = 0.5 - \frac{1}{2\sqrt{10^{e_r/10}}} \quad (201)$$

平方法计算占比的公式如下：

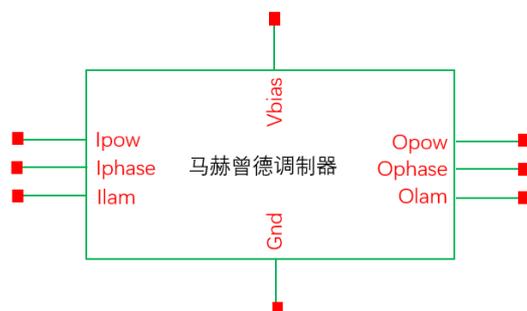
$$\gamma_{up} = \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{1}{2\sqrt{10^{e_r/10}}}} \quad (202)$$

$$\gamma_{down} = \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{2\sqrt{10^{e_r/10}}}} \quad (203)$$

注意：平方法的消光比不应小于6.02，否则占比将出现复数！

6.6 含折射率变化的马赫曾德调制器

模型样式



端口

	端口名称	描述
电学端口	Vbias	电信号输入
光学端口	Ipow	功率输入
	Iphase	相位输入
	Ilam	波长输入
	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出
接地	Gnd	接地

参数

参数	单位	值域	典型值
design_lam 设计波长	m	(0,∞)	1.55e-6
n_ps MMI波导折射率		(0,∞)	3.45
n_sub 衬底折射率		(0,∞)	1.45
width_MMI MMI干涉区长度	m	(0,∞)	3e-6
width_port MMI端口长度		(0,∞)	4.5e-7
port_offset 端口位置		(0,∞)	7.5e-7
thickness MMI厚度	m	(0,∞)	2.2e-7

参数	单位	值域	典型值
alpha_mmi MMI光衰减	m^{-1}	(0,∞)	80
l_ps 相移区域长度	m	(0,∞)	1e-7
l_arm 两臂波导长度	m	(0,∞)	4e-5
alpha_phaseshift_ref 相移区域基本光衰减	m^{-1}	[0,∞)	80
alpha_waveguide 波导光衰减	m^{-1}	[0,∞)	80
alpha_absorp 吸收校正系数		(0,∞)	1
alpha_wd 扩散宽度校正系数		(0,∞)	1
rib_width 脊形波导宽度	m	(0,∞)	4e-7
pn_offset PN结偏移调整系数	m	[0,∞)	0
ni 本征载流子浓度	m^{-3}	(0,∞)	1e16
N_A 受主浓度	m^{-3}	(0,∞)	5e23
N_D 施主浓度	m^{-3}	(0,∞)	1e24
Lp 空穴扩散长度	m	(0,∞)	2e-6
Ln 电子扩散长度	m	(0,∞)	1e-6
epsr_Si 硅的相对介电常数		(0,∞)	11.7
Is 稳态电流	A	(0,∞)	1e-14
IBV 反向击穿电流	A	(0,∞)	1000u
BV 反向击穿电压	V	(0,∞)	40
V0 发射系数	V	(0,∞)	1
Cj0 零偏结电容	F	(0,∞)	1.5e-12

参数	单位	值域	典型值
tau 注入寿命	s	(0,∞)	5e-10
Rs 串联电阻	Ω	(0,∞)	55
emi 辐射系数		(0,∞)	1
Vt 热电压	V	(0,∞)	0.0259
neff_ps_filename 折射率文件位置	不适用		

理论

该模型基于文献^[1]搭建。该模型由一个1×2MMI、一个2×2MMI、一个由电压和折射率控制的连接两个MMI的相移器、一个连接两个MMI另一组端口的波导组成。该模型的光输入输出变化如下：

$$E_{\text{out}} = M_{M1} \begin{bmatrix} p_{ps} & 0 \\ 0 & p_{wg} \end{bmatrix} M_{M2} E_{\text{in}} \quad (204)$$

式中， M_{M1} 和 M_{M2} 表达了MMI对光信号的处理，相关理论见MMI的理论描述。中间的矩阵为相移器和波导的组合矩阵， p_{ps} 表达了加电压的相移器对光的影响， p_{wg} 表达了波导对光的影响。

相移器参数 p_{ps} 由下式给出：

$$p_{ps} = \exp(\kappa_{ps} \cdot L_{ps}) \quad (205)$$

其中 L_{ps} 为相移部分的长度， κ_{ps} 为耦合系数，表达式如下：

$$\kappa_{ps} = -\alpha_{ps} \cdot \alpha_{\text{abs}} + j\beta_{ps} \quad (206)$$

式中 α_{ps} 代表了相移器的内部损耗， α_{abs} 为调整参数， β_{ps} 为传播常数，表达式如下：

$$\beta_{ps} = \frac{2\pi n_{\text{eff,ps}}}{\lambda} \quad (207)$$

式中， $n_{\text{eff,ps}}$ 为相移器的有效折射率。

为了计算相移器内部损耗并反映折射率随电压的变化，需要计算载流子浓度分布。该模型在电学部分采用了PN结模型，PN结中的载流子浓度分布如下：

$$p_n(x, V) = p_{n0} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \exp\left(-\frac{x - W_{Dn}}{L_p}\right) + p_{n0} \quad (208)$$

$$n_p(x, V) = n_{p0} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \exp\left(-\frac{x - W_{Dp}}{L_n}\right) + n_{p0} \quad (209)$$

式中， p_n 和 n_p 分别是N区和P区的空穴和电子浓度， L_p 和 L_n 分别是空穴和电子的扩散长度， p_{n0} 和 n_{p0} 是初始浓度，等于热平衡中的 n_i^2/N_D 和 n_i^2/N_A ， N_A 和 N_D 分别为P区施主浓度和N区

受主浓度， W_{D_n} 和 W_{D_p} 表达了N区和P区的耗尽宽度，其表达式如下：

$$W_{D_p} = \frac{N_D \cdot W}{N_A + N_D} \quad (210)$$

$$W_{D_n} = \frac{N_A \cdot W}{N_A + N_D} \quad (211)$$

式中，

$$W = \alpha_{wd} \cdot \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{inj}}{q \cdot N_{avr}}} \quad (212)$$

其中， α_{wd} 为扩散宽度校正系数， ε 为介电常数， N_{avr} 的表达式如下：

$$N_{avr} = N_A \cdot N_D / (N_A + N_D) \quad (213)$$

V_{inj} 的表达式如下：

$$V_{inj} = \frac{kT}{q} \log_{10} \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) - V(t) \quad (214)$$

式中， $V(t)$ 为驱动电压。

脊波导区域内某一点的损耗变化如下：

$$\Delta\alpha = n_p \sigma_{ae} + p_n \sigma_{ah} \quad (215)$$

式中， σ_{ae} 和 σ_{ah} 都是和材料及波长有关的参数。在整个脊波导范围内求平均值即可得到由外加电压导致的损耗变化 $\Delta\alpha_{ps,avg}$ 。相移器总内部损耗由下式给出：

$$\alpha_{ps} = \alpha_{ps,ref} + \Delta\alpha_{ps,avg} \quad (216)$$

式中， $\alpha_{ps,ref}$ 为无偏压下相移器的损耗。

驱动电压的等效电路模型如下：

$$V'(t) = \left[C(V(t)) \frac{dV(t)}{dt} + I_D(t) \right] \cdot R_S + V(t) \quad (217)$$

式中， $V'(t)$ 为加载到调制器上的电压， R_S 为串联电阻， $C(V(t))$ 为电容，由结电容 C_J 和扩散电容 C_D 组成，二者的表达式如下：

$$C_J = \frac{C_J(0)}{\sqrt{1 - V(t)/V_0}} \quad (218)$$

$$C_D = \frac{I_D(t)\tau}{nV_t} \quad (219)$$

上述各式中， $C_J(0)$ 为零偏结电压， V_0 为结电势， n 为辐射系数， V_t 为热电压， τ 为注入寿命。 $I_D(t)$ 二极管的总电流，由下式给出：

$$I_D(t) = I_S \left[\exp \left(\frac{V(t)}{nV_t} \right) - 1 \right] + V(t)g_D \quad (220)$$

式中， I_S 为稳态电流，缩放因子 g_D 由下式给出：

$$g_D = \frac{IBV - I_S \cdot (\exp(5) - 1)}{BV - 5n \cdot V_t} \quad (221)$$

式中 BV 、 IBV 为相关参数。

波导参数 p_{wg} 由下式给出：

$$p_{wg} = \exp((\kappa_{ps} + \alpha_{wg} - \alpha_{ps,ref}) \cdot (L_{ps} + L_{arm})) \quad (222)$$

式中， α_{wg} 为波导的光损耗， L_{arm} 为两臂的波导长度。

输入文件格式

该模型需要输入折射率随波长及P区耗尽宽度变化的文件。该文件格式如下：

W_{D_p} 起始值	W_{D_p} 结束值	W_{D_p} 采样数m		
波长起始值	波长结束值	波长采样数n		
数据1	数据2	数据3	...	数据n
数据n+1	数据n+2	数据n+3	...	数据2n
...
数据(m-1)×n+1	数据(m-1)×n+2	数据(m-1)×n+3	...	数据m×n

该文件中每一行的 W_{D_p} 相同，每一列的波长相同。模型将使用插值方式获得所需数据点对应的折射率。若当前数据点超出数据文件的范围，模型将弹出警告。

示例

使用的原理图如图37所示。使用电压源V3、V2、V1控制理想光源的输出功率、相位和波长。使用开关S0控制输入的电信号，即由V0产生的恒定信号或由随机信号发生器I4产生的随机码信号。测量马赫曾德调制器的光输出端口即可获得该调制器的工作情况。使用该原理图进行不同波长下光功率变化和眼图仿真，可得到图38和39中的结果。

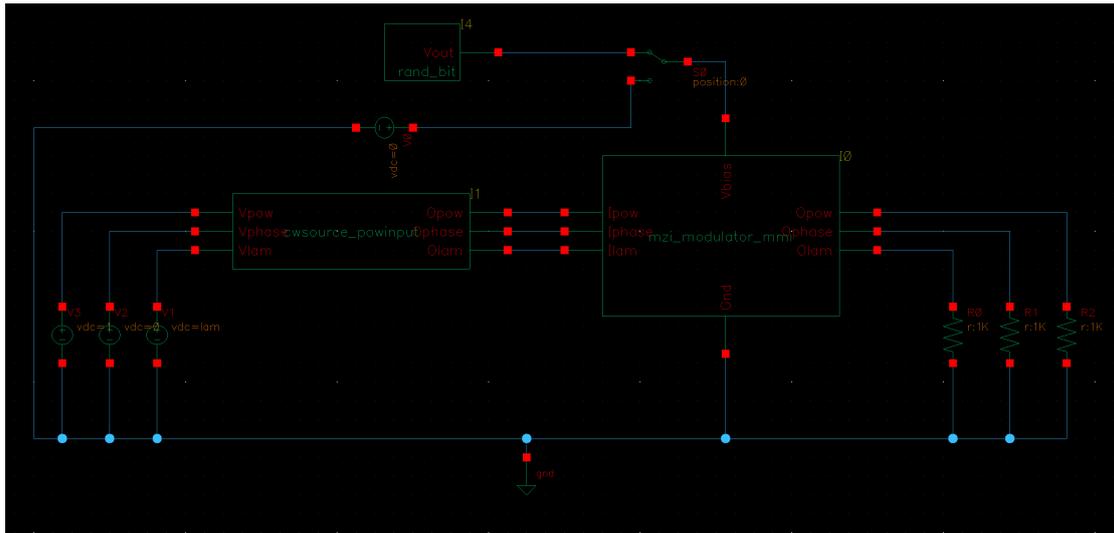


图 37: 马赫曾德调制器仿真原理图

对比

我们使用文献^[1]中的数据，对马赫曾德调制器输出光功率随波长的变化进行了对比，结果如图40所示。

参考文献

- [1] CHEN X, WANG Z, CHANG Y S, et al. Modeling and Analysis of Optical Modulators Based on Free-Carrier Plasma Dispersion Effect[J/OL]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2020, 39(5): 977-990[2024-

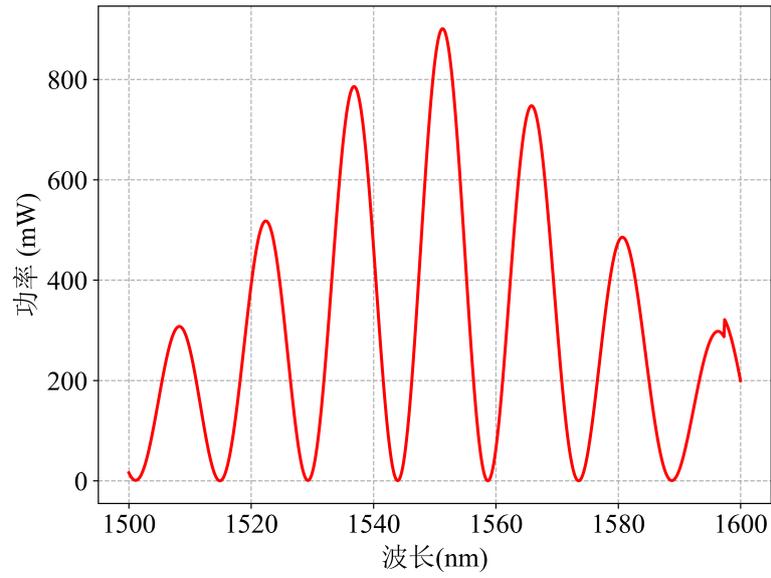


图 38: 马赫曾德调制器的光输出随波长的变化

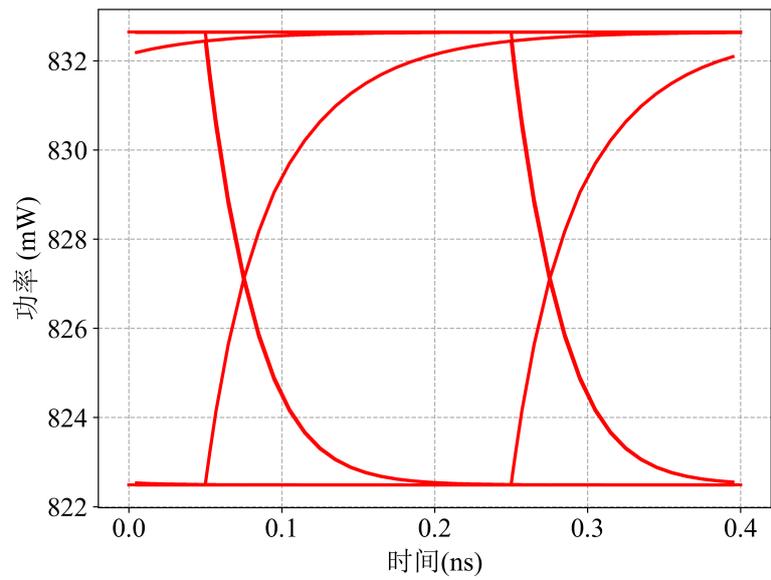


图 39: 马赫曾德调制器眼图仿真结果

01-08]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8675505/>. DOI: 10.1109/TCAD.2019.2907907.

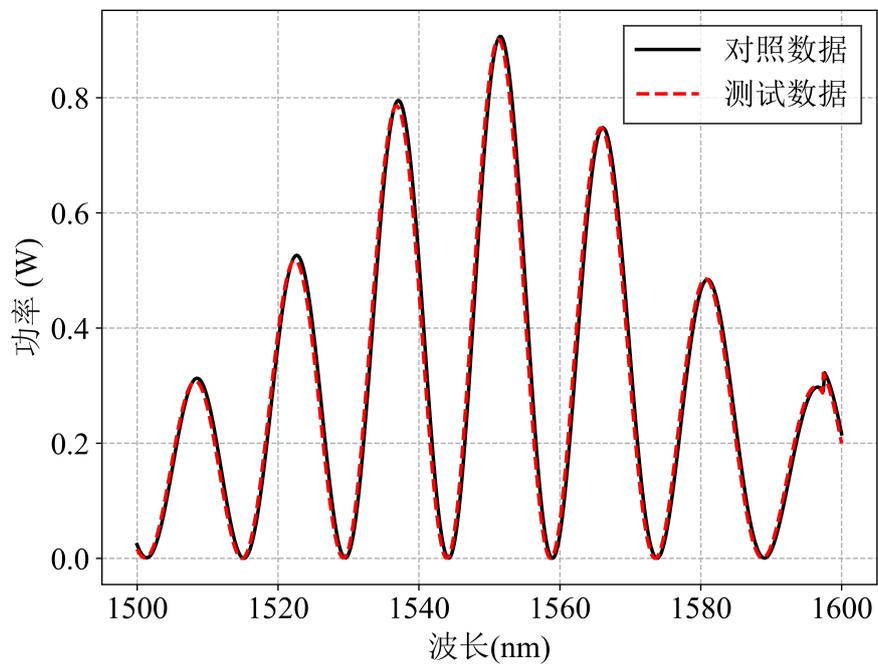
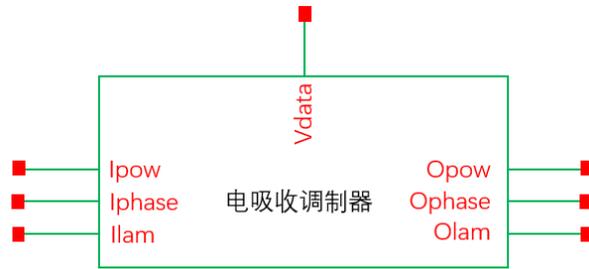


图 40: 马赫曾德调制器输出光功率随波长的变化结果对比

6.7 理想电吸收调制器

模型样式



端口

	端口名称	描述
电学端口	Vdata	电信号输入
光学端口	Ipow	功率输入
	Iphase	相位输入
	Ilam	波长输入
	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出

参数

参数	单位	值域	典型值
modu 调制系数		[0,1)	0.9
chir 啁啾系数		$(-\infty, \infty)$	0

理论

该模型为理想电吸收调制器，其光功率输出如下：

$$P_{\text{out}}(t) = P_{\text{in}}(t) \cdot d(t) = P_{\text{in}}(t) \cdot ((1 - m) + m \cdot V_{\text{data}}) \quad (223)$$

式中 m 为调制系数， V_{data} 为随时间变化的电压信号。

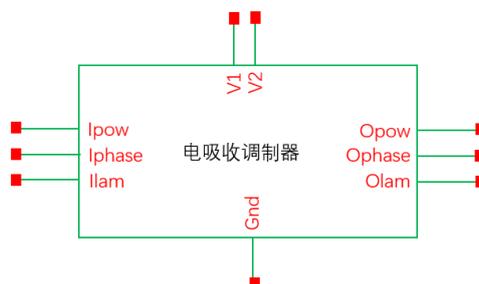
该调制器的光相位变化如下：

$$\phi = \phi_0 + \frac{\sigma}{2} \ln((1 - m) + m \cdot V_{\text{data}}) \quad (224)$$

式中， σ 为啁啾系数。

6.8 基本电吸收调制器

模型样式



端口

	端口名称	描述
电学端口	V1	电信号差分输入端口1
	V2	电信号差分输入端口2
光学端口	Ipow	功率输入
	Iphase	相位输入
	Ilam	波长输入
	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出
接地	Gnd	接地

参数

参数	单位	值域	典型值
Gam_c 端面损耗	m^{-1}	$(-\infty, \infty)$	0
tau_L 载流子寿命精度		$[1, \infty)$	6
num_carriler 载流子浓度拟合次数		$[1, \infty)$	2
num_voltage 电压拟合次数		$[1, \infty)$	6
tau_file 寿命数据文件位置	不适用		
gamma_file 损耗数据文件位置	不适用		
alpha_file 啁啾数据文件位置	不适用		

理论

该模型为电吸收调制器，采用了文献^[1]的方案。该模型中光的幅值和相位变化如下：

$$E_{\text{out}}e^{j\phi_{\text{out}}} = E_{\text{in}}e^{-k_0Ln_i}e^{j(\phi_{\text{in}}-k_0Ln_r)} \quad (225)$$

令损耗系数 $\Gamma = 2k_0Ln_i$ ，相位变化 $\phi_0 = -k_0Ln_r$ ，有：

$$E_{\text{out}}(t) = E_{\text{in}}e^{-\Gamma/2} \quad (226)$$

$$\frac{d\phi_0}{dt} = \frac{\alpha(V, N)}{2} \cdot \frac{d\Gamma(V, N)}{dt} \quad (227)$$

式中， V 为差分电压信号，即两个电端口的电压差， N 为载流子浓度，由下式给出：

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\lambda}{hc}e^{-\Gamma_c} \left(1 - e^{-\Gamma(V, N)+2\Gamma_c}\right) E_{\text{in}}^2 - \frac{N}{\tau} \quad (228)$$

式中， Γ_c 为表面损耗， τ 为载流子寿命，由下式给出：

$$\tau = p_0 + p_1V + p_2V^2 + \dots + p_LV^L \quad (229)$$

式中 L 为载流子寿命精度，各项系数从文件中读取。

上述公式中的 $\Gamma(V, N)$ 和 $\alpha(V, N)$ 分别表达了损耗和啁啾随电压和载流子浓度的变化，一般形式如下：

$$F(N, V) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^K A_{i,j} \cdot V^{(j-1)} \cdot N^{(i-1)} \quad (230)$$

式中 M 为载流子浓度拟合次数， K 为电压拟合次数，系数 $A_{i,j}$ 从文件中读取。

输入文件格式

τ 计算系数

(229)中的系数 p_L 由变量**tau_file**定义的文件决定。该文件为一列数据，每行的数据代表对应阶次的拟合系数。

$\Gamma(V, N)$ 和 $\alpha(V, N)$ 计算系数

使用(230)计算 $\Gamma(V, N)$ 时的系数由变量**gamma_file**定义的文件决定，计算 $\alpha(V, N)$ 时的系数由变量**alpha_file**定义的文件决定。这些文件的内容为一个 M 行 K 列的矩阵， M 为载流子浓度拟合次数， K 为电压拟合次数，每一个数据即为对应的系数 $A_{i,j}$ 。

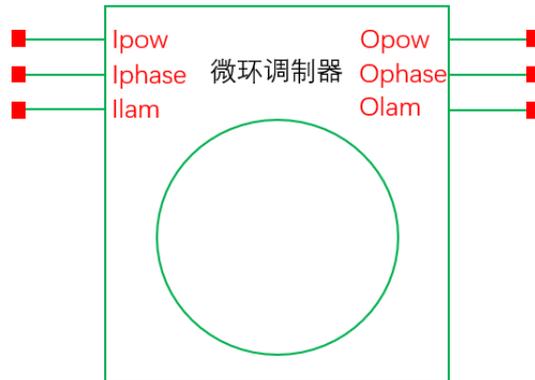
参考文献

- [1] CHENG N, CARTLEDGE J. Measurement-based model for MQW electroabsorption modulators[J/OL]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(12): 4265-4269[2023-08-01]. <http://ieeexplore.ieee.org/document/1566754/>. DOI: 10.1109/JLT.2005.858217.

7 微环

7.1 理想微环谐振器

模型样式



端口

	端口名称	描述
光学端口	Ipow	功率输入
	Iphase	相位输入
	Ilam	波长输入
	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出

参数

参数	单位	值域	典型值
t_abs 传播常数幅值		[0,1]	0.8
t_theta 传播常数相位		(-360,360)	0
alpha 器件损耗	m^{-1}	(0,∞)	7.1029e3
r 微环半径	m	(0,∞)	1e-5
neff 有效折射率		(0,∞)	3.42

理论

该模型为理想微环调制器。该模型输出光的变化由下式给出：

$$E_{\text{out}} = E_{\text{in}} \cdot \frac{t - ae^{i\theta}}{1 - ate^{i\theta}} \quad (231)$$

其中，

$$a = e^{-\alpha L/2} \quad (232)$$

$$\theta = \frac{\omega}{c} n_{\text{eff}} L \quad (233)$$

上述公式中， t 为传播常数， α 为器件损耗， L 为微环周长， ω 为角速度，通过波长计算得来， n_{eff} 为有效折射率。

示例

使用的原理图如图41所示。使用电压源V0、V1、V2控制理想光源的输出功率、相位和波长。测量微环调制器的光输出端口即可获得该调制器的工作情况。使用该原理图进行不同波长下光功率变化，可得到图42中的结果。

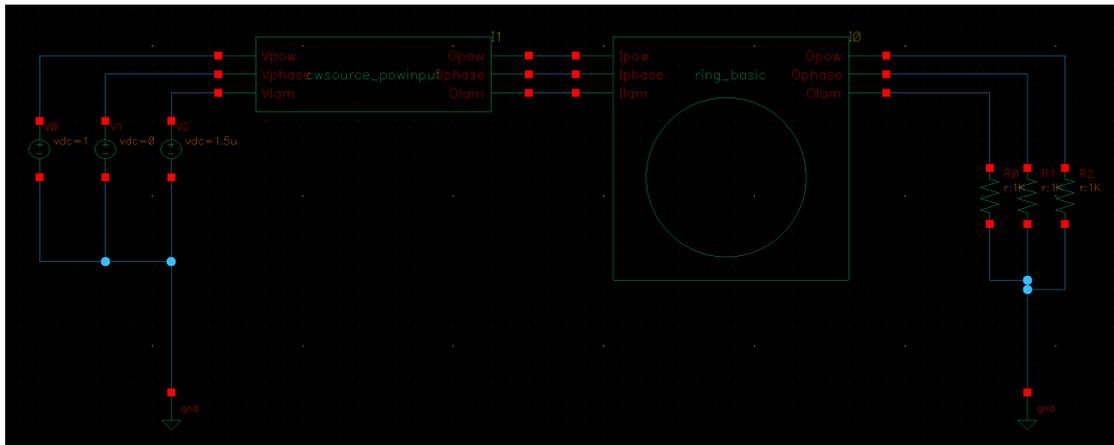


图 41：理想微环调制器仿真原理图

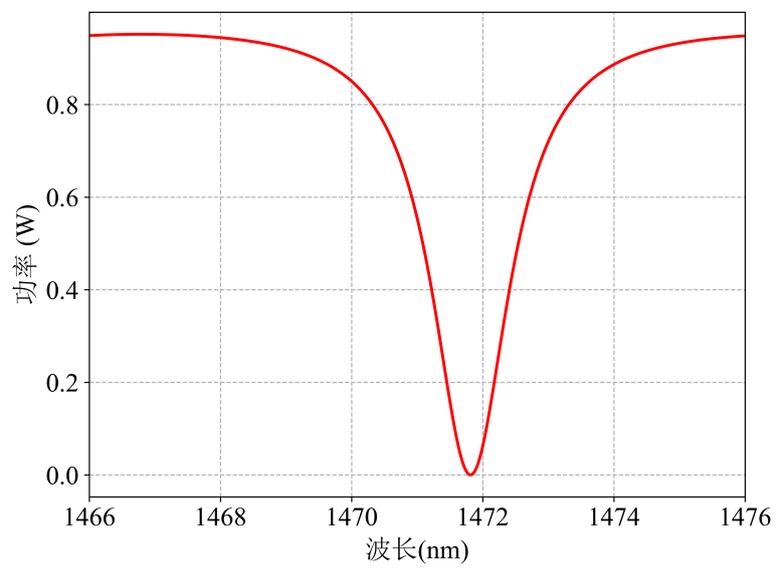
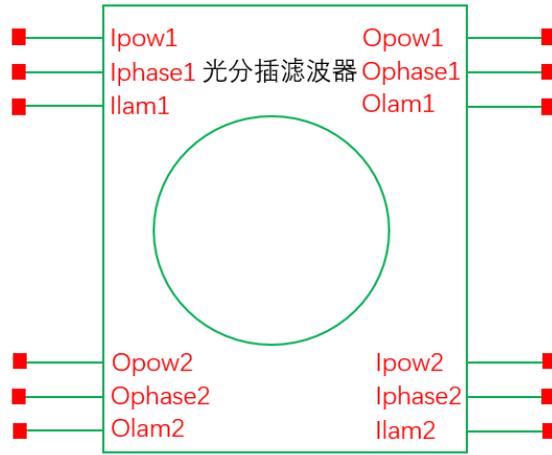


图 42: 理想微环调制器的光输出随波长的变化

7.2 理想光分插滤波器

模型样式



端口

	端口名称	描述
光学端口	Ipow1	输入端口1功率输入
	Iphase1	输入端口1相位输入
	Ilam1	输入端口1波长输入
	Ipow2	输入端口2功率输入
	Iphase2	输入端口2相位输入
	Ilam2	输入端口2波长输入
	Opow1	输出端口1功率输出
	Ophase1	输出端口1相位输出
	Olam1	输出端口1波长输出
	Opow2	输出端口2功率输出
	Ophase2	输出端口2相位输出
	Olam2	输出端口2波长输出

参数

参数	单位	值域	典型值
r 微环半径	m	$(0, \infty)$	1e-5
alpha 器件损耗	m^{-1}	$(0, \infty)$	7.1029e3
t1_abs 输入端口1到输出端口1传播常数幅值		[0,1]	0.8
t1_theta 输入端口1到输出端口1传播常数相位		$(-360, 360)$	0

参数	单位	值域	典型值
t2_abs 输入端口2到输出端口2传播常数幅值		[0,1]	0.8
t2_theta 输入端口2到输出端口2相位		(-360,360)	0
neff 有效折射率		(0,∞)	3.42

理论

该模型为理想光分插滤波器。该模型端口间输出光的变化由下式给出：

$$E_{\text{out1}} = E_{\text{in1}} \cdot \frac{t_1 - at_2^*e^{i\theta}}{1 - at_2^*t_1^*e^{i\theta}} + E_{\text{in2}} \cdot \frac{-\kappa_2^*\kappa_1a^{1/2}e^{i\theta/2}}{1 - at_2^*t_1^*e^{i\theta}} \quad (234)$$

$$E_{\text{out1}} = E_{\text{in1}} \cdot \frac{-\kappa_2\kappa_1^*a^{1/2}e^{i\theta/2}}{1 - at_2^*t_1^*e^{i\theta}} + E_{\text{in2}} \cdot \frac{t_2 - at_1^*e^{i\theta}}{1 - at_2^*t_1^*e^{i\theta}} \quad (235)$$

其中，

$$a = e^{-\alpha L/2} \quad (236)$$

$$\theta = \frac{\omega}{c}n_{\text{eff}}L \quad (237)$$

$$tt^* + \kappa\kappa^* = 1 \quad (238)$$

上述公式中， t 为传播常数， κ 为耦合系数， α 为器件损耗， L 为微环周长， ω 为角速度，通过波长计算得来， n_{eff} 为有效折射率。

示例

使用的原理图如图43所示。使用电压源V0、V1、V2控制理想光源的输出功率、相位和波长。测量光分插滤波器的光输出端口即可获得该调制器的工作情况。使用该原理图进行不同波长下光功率变化，可得到图44中的结果。

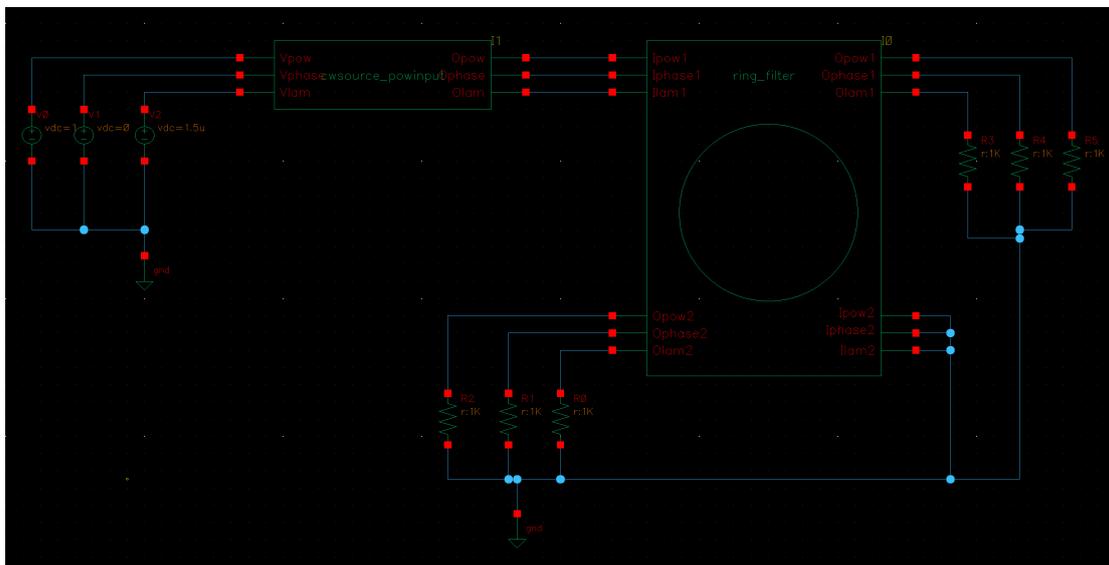


图 43: 理想光分插滤波器仿真原理图

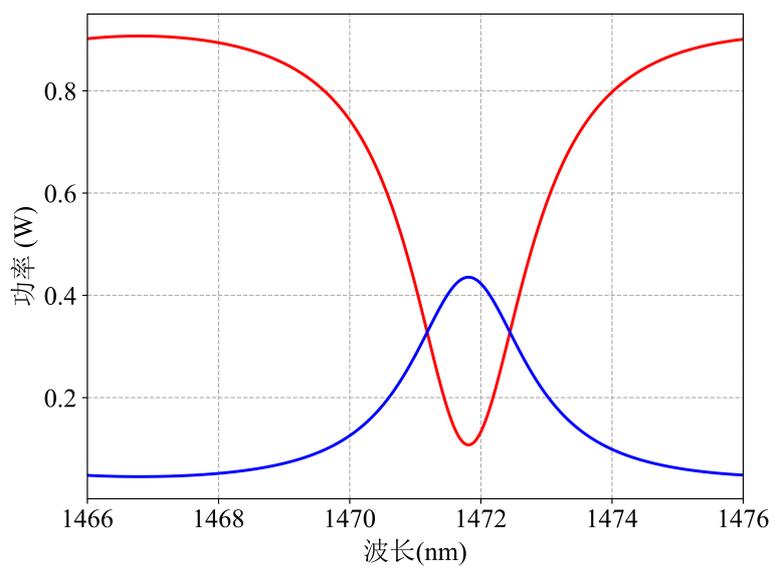
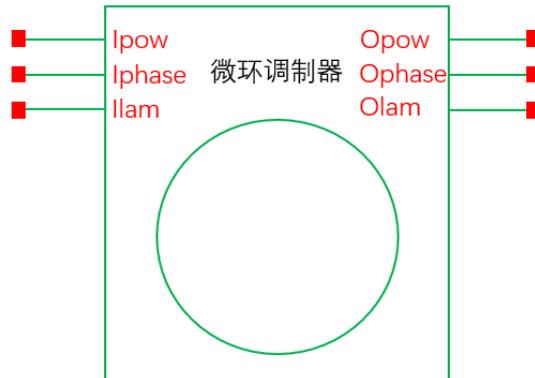


图 44: 理想光分插滤波器的光输出随波长的变化

7.3 基本微环调制器

模型样式



端口

	端口名称	描述
光学端口	Ipow	功率输入
	Iphase	相位输入
	Ilam	波长输入
	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出

参数

参数	单位	值域	典型值
modespec 模式类型, 1为TE模, 2为TM模	不适用	1,2	1
alpha_use_dBm 衰减单位, 0为 m^{-1} , 1为dB/m	不适用	0,1	1
l_bus 直波导长度	m	$[0, \infty)$	1e-3
r_ring 微环半径	m	$[0, \infty)$	7.5e-6
attenu_bus_te 直波导TE模衰减 (单位受alpha_use_dBm控制)	m^{-1} 或dB/m	$[0, \infty)$	0 dB/m
attenu_bus_tm 直波导TM模衰减 (单位受alpha_use_dBm控制)	m^{-1} 或dB/m	$[0, \infty)$	0 dB/m
attenu_ring_te 微环TE模衰减 (单位受alpha_use_dBm控制)	m^{-1} 或dB/m	$[0, \infty)$	0 dB/m

参数	单位	值域	典型值
attenu_ring_tm 微环TM模衰减（单位受alpha_use_dBm控制）	m ⁻¹ 或dB/m	[0,∞)	0 dB/m
phasedelay_bus_te 直波导TE模相移	°		0
phasedelay_bus_tm 直波导TM模相移	°		0
phasedelay_ring_te 微环TE模相移	°		0
phasedelay_ring_tm 微环TM模相移	°		0
neff_te TE模有效折射率		(0,∞)	2.6
neff_tm TM模有效折射率		(0,∞)	2.6
coupling_ring_te TE模耦合功率比		[0,1]	0.145
coupling_ring_tm TM模耦合功率比		[0,1]	0.145
reffreq 参考频率	Hz	(0,∞)	1.931e14
n_gv_te TE模群折射率		(0,∞)	4.2
n_gv_tm TM模群折射率		(0,∞)	4.2
disper_te TE模色散	s · m ⁻²	(0,∞)	0
disper_tm TM模色散	s · m ⁻²	(0,∞)	0

理论

该模型为不含电压输入的基本微环调制器，支持TE模或TM模传播，不支持同时传播及模式耦合。对于一种模式，光信号的变化由下述矩阵控制：

$$E_{\text{out}} = T(f) \cdot E_{\text{in}} \quad (239)$$

式中：

$$T(f) = \frac{1 - t \exp(j\theta)}{t - \exp(j\theta)} \cdot \exp \left\{ -j\tilde{\beta}^{\text{bus}} L_{\text{bus}} \right\} \quad (240)$$

其中，

$$\theta = \tilde{\beta}^{\text{ring}} L_{\text{ring}} - \delta\phi \quad (241)$$

$$t = \sqrt{1 - K} \quad (242)$$

式中， L_{bus} 为直波导的长度， L_{ring} 为微环的周长（可由半径求得）， K 为耦合功率比。

传播系数 $\tilde{\beta}(f)$ 由下式定义：

$$\tilde{\beta}(f) = \frac{2\pi f_0}{c} \cdot n_{\text{eff}}(f_0) + \frac{2\pi}{c} \cdot n_{\text{gr}}(f_0) \cdot (f - f_0) - \frac{\pi c \cdot D(f_0)}{f_0^2} \cdot (f - f_0)^2 - \frac{j}{2} \alpha \quad (243)$$

式中， f_0 为参考频率， n_{eff} 为有效折射率， n_{gr} 为群折射率， α 为衰减， D 为色散。对于 $\tilde{\beta}_{\text{up}}(f)$ 和 $\tilde{\beta}_{\text{low}}(f)$ ，将对应折射率及色散代入即可。

示例

使用的原理图如图45所示。使用电压源V0、V1、V2控制理想光源的输出功率、相位和波长。测量微环调制器的光输出端口即可获得该调制器的工作情况。使用该原理图进行不同波长下光功率变化，可得到图46中的结果。

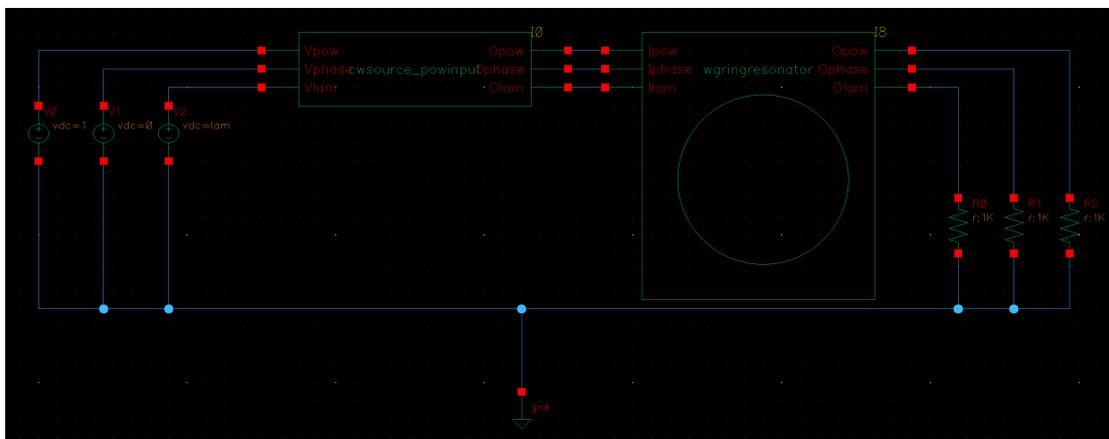


图 45: 基本微环调制器仿真原理图

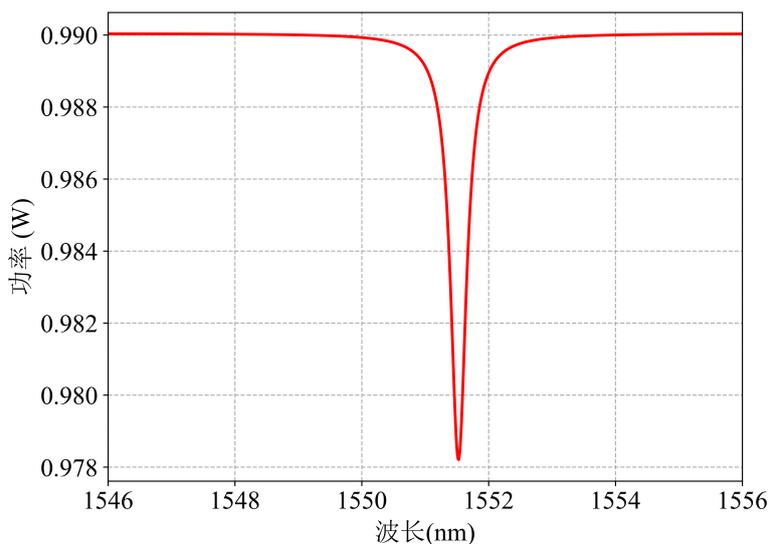


图 46: 基本微环调制器的光输出随波长的变化

对比

我们使用文献^[1]中的数据，对基本微环调制器输出光功率随波长的变化进行了对比，结果如图47所示。

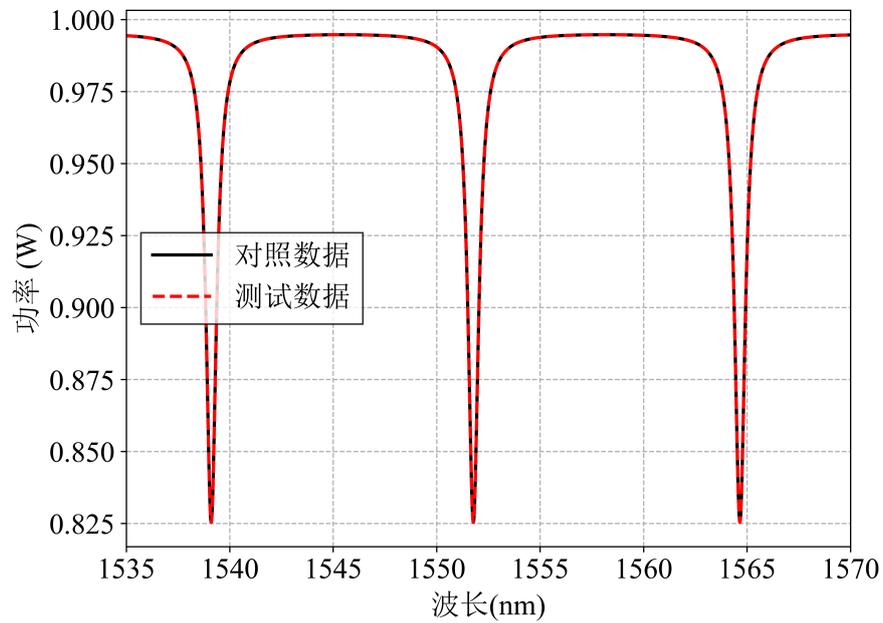


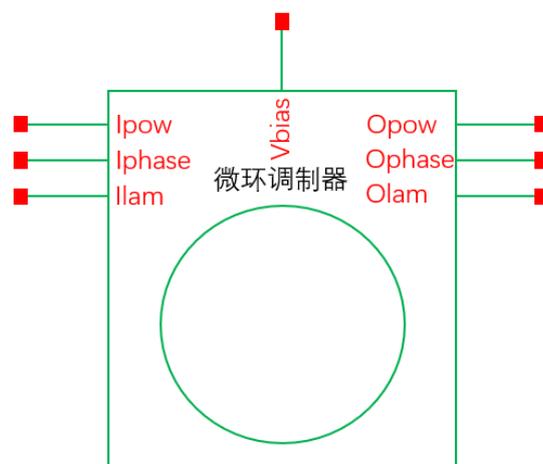
图 47: 基本微环调制器输出光功率随波长的变化结果对比

参考文献

- [1] MING D, WANG Y, WANG Z, et al. EPHIC Models: General SPICE Photonic Models for Closed-Loop Electronic-Photonic Co-Simulation[J/OL]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2024: 1-13[2024-02-26]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10431798/>. DOI: 10.1109/TCSI.2024.3353459.

7.4 基本微环调制器（含电压）

模型样式



端口

	端口名称	描述
电学端口	Vbias	偏压输入
光学端口	Ipow	功率输入
	Iphase	相位输入
	Ilam	波长输入
	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出

参数

参数	单位	值域	典型值
modespec 模式类型，1为TE模，2为TM模	不适用	1,2	1
alpha_use_dBm 衰减单位，0为 m^{-1} ，1为dB/m	不适用	0,1	1
l_bus 直波导长度	m	$[0, \infty)$	1e-3
r_ring 微环半径	m	$[0, \infty)$	7.5e-6
phasedelay_bus_te 直波导TE模相移	°		0
phasedelay_bus_tm 直波导TM模相移	°		0

参数	单位	值域	典型值
phasedelay_ring_te 微环TE模相移	°		0
phasedelay_ring_tm 微环TM模相移	°		0
read_neff 读取有效折射率文件，1为读取，0为不读取		0,1	1
file_neff_bus_te TE模直波导折射率文件路径	不适用		
file_neff_bus_tm TM模直波导折射率文件路径	不适用		
file_neff_ring_te TE模微环折射率文件路径	不适用		
file_neff_ring_tm TM模微环折射率文件路径	不适用		
file_deltanreff_te TE模折射率随电压变化文件路径	不适用		
file_deltanreff_tm TM模折射率随电压变化文件路径	不适用		
neff_bus_te TE模直波导折射率（未读取文件时使用）		(0,∞)	2.6
neff_bus_tm TM模直波导折射率（未读取文件时使用）		(0,∞)	2.6
neff_ring_te TE模微环折射率（未读取文件时使用）		(0,∞)	2.6
neff_ring_tm TM模微环折射率（未读取文件时使用）		(0,∞)	2.6
attenu_bus_te 直波导TE模衰减 (未读取文件时使用，单位受alpha_use_dBm控制)	m ⁻¹ 或dB/m	[0,∞)	0 dB/m
attenu_bus_tm 直波导TM模衰减 (未读取文件时使用，单位受alpha_use_dBm控制)	m ⁻¹ 或dB/m	[0,∞)	0 dB/m
attenu_ring_te 微环TE模衰减 (未读取文件时使用，单位受alpha_use_dBm控制)	m ⁻¹ 或dB/m	[0,∞)	0 dB/m
attenu_ring_tm 微环TM模衰减 (未读取文件时使用，单位受alpha_use_dBm控制)	m ⁻¹ 或dB/m	[0,∞)	0 dB/m
delta_neff_perv_te TE模折射率随电压变化（未读取文件时使用）			0

参数	单位	值域	典型值
delta_neff_perv_tm TM模折射率随电压变化（未读取文件时使用）			0
delta_attenu_perv_te TE模衰减随电压变化 （未读取文件时使用，单位受 alpha_use_dBm 控制）	m ⁻¹ 或dB/m		0 dB/m
delta_attenu_perv_tm TM模衰减随电压变化 （未读取文件时使用，单位受 alpha_use_dBm 控制）	m ⁻¹ 或dB/m		0 dB/m
reffreq 参考频率	Hz	(0,∞)	1.931e14
n_gv_bus_te TE模直波导群折射率		(0,∞)	4.2
n_gv_bus_tm TM模直波导群折射率		(0,∞)	4.2
n_gv_ring_te TE模微环群折射率		(0,∞)	4.2
n_gv_ring_tm TM模微环群折射率		(0,∞)	4.2
disper_bus_te TE模直波导色散			0
disper_bus_tm TM模直波导色散			0
disper_ring_te TE模微环色散			0
disper_ring_tm TM模微环色散			0
read_coupling_ring 读取耦合功率比文件，1为读取，0为不读取		0,1	0
coupling_ring_te TE模耦合功率比（未读取文件时使用）		[0,1]	0.145
coupling_ring_tm TM模耦合功率比（未读取文件时使用）		[0,1]	0.145
file_coupling_ring_te TE模耦合功率比文件路径	不适用		
file_coupling_ring_tm TM模耦合功率比文件路径	不适用		

理论

该模型为含电压输入的基本微环调制器，支持TE模或TM模传播，不支持同时传播及模式耦合。对于一种模式，光信号的变化由下述矩阵控制：

$$E_{\text{out}} = T(f) \cdot E_{\text{in}} \quad (244)$$

式中：

$$T(f) = \frac{1 - t \exp(j\theta)}{t - \exp(j\theta)} \cdot \exp\{-j\tilde{\beta}^{\text{bus}} L_{\text{bus}}\} \quad (245)$$

其中，

$$\theta = \tilde{\beta}^{\text{ring}} L_{\text{ring}} - \delta\phi \quad (246)$$

$$t = \sqrt{1 - K} \quad (247)$$

式中， L_{bus} 为直波导的长度， L_{ring} 为微环的周长（可由半径求得）， K 为耦合功率比。

耦合功率比的大小和光信号的波长有关。在本模型中，通过读取包含波长和耦合功率比的文件并进行拟合来获得当前微环的耦合功率比。

电压对微环的影响主要体现在复折射率的变化上，而复折射率的虚部确定了器件的光衰减，因此该模型仅读取0V时的复折射率和复折射率随电压的变化即可直接获得有效折射率和光衰减的数值。由此可求得传播常数 $\tilde{\beta}(f)$ ：

$$\tilde{\beta}(f) = \frac{2\pi f}{c} \cdot n_{\text{eff}}(f) - \frac{j}{2}\alpha \quad (248)$$

该模型也可通过输入对应的参数，通过一次函数的形式来反映电压对折射率的变化。此时，该模型的理论方案和无电压端口的基本微环调制器一致。

输入文件格式

耦合功率比

耦合功率比由变量**file_coupling_ring_te**（TE模）和**file_coupling_ring_tm**（TM模）定义的文件决定。该文件第一行表达了文件中数据点的数量，后续部分为两列，第一列为波长（单位为m），第二列为对应的耦合功率比。

复折射率

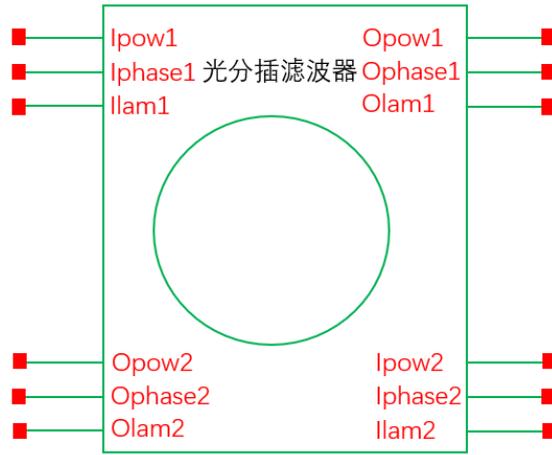
直波导的复折射率由变量**file_neff_bus_te**（TE模）和**file_neff_bus_tm**（TM模）定义的文件决定。微环的复折射率由变量**file_neff_ring_te**（TE模）和**file_neff_ring_tm**（TM模）定义的文件决定。该文件第一行表达了文件中数据点的数量，后续部分为三列，第一列为电压（单位为V），第二列为对应的折射率实部，第三列为对应的折射率虚部。

复折射率随电压的变化

复折射率随电压的变化由变量**file_deltan_eff_te**（TE模）和**file_deltan_eff_tm**（TM模）定义的文件决定。该文件第一行表达了文件中数据点的数量，后续部分为三列，第一列为电压（单位为V），第二列为对应的折射率实部的变化值，第三列为对应的折射率虚部的变化值。

7.5 基本光分插滤波器

模型样式



端口

	端口名称	描述
光学端口	Ipow1	输入端口1功率输入
	Iphase1	输入端口1相位输入
	Ilam1	输入端口1波长输入
	Ipow2	输入端口2功率输入
	Iphase2	输入端口2相位输入
	Ilam2	输入端口2波长输入
	Opow1	输出端口1功率输出
	Ophase1	输出端口1相位输出
	Olam1	输出端口1波长输出
	Opow2	输出端口2功率输出
	Ophase2	输出端口2相位输出
	Olam2	输出端口2波长输出

参数

参数	单位	值域	典型值
modespec 模式类型, 1为TE模, 2为TM模	不适用	[1,2]	1
alpha_use_dBm 衰减单位, 0为 m^{-1} , 1为dB/m	不适用	0,1	1
l_bus 直波导长度	m	$[0, \infty)$	1e-3
r_ring 微环半径	m	$[0, \infty)$	7.5e-6

参数	单位	值域	典型值
attenu_bus_te 直波导TE模衰减（单位受alpha_use_dBm控制）	m^{-1} 或dB/m	$[0, \infty)$	0 dB/m
attenu_bus_tm 直波导TM模衰减（单位受alpha_use_dBm控制）	m^{-1} 或dB/m	$[0, \infty)$	0 dB/m
attenu_ring_te 微环TE模衰减（单位受alpha_use_dBm控制）	m^{-1} 或dB/m	$[0, \infty)$	0 dB/m
attenu_ring_tm 微环TM模衰减（单位受alpha_use_dBm控制）	m^{-1} 或dB/m	$[0, \infty)$	0 dB/m
phasedelay_bus_te 直波导TE模相移	$^{\circ}$		0
phasedelay_bus_tm 直波导TM模相移	$^{\circ}$		0
phasedelay_ring_te 微环TE模相移	$^{\circ}$		0
phasedelay_ring_tm 微环TM模相移	$^{\circ}$		0
neff_te TE模有效折射率		$(0, \infty)$	2.6
neff_tm TM模有效折射率		$(0, \infty)$	2.6
coupling_ring_te_up TE模上臂耦合功率比		$[0, 1]$	0.145
coupling_ring_tm_up TM模上臂耦合功率比		$[0, 1]$	0.145
coupling_ring_te_down TE模下臂耦合功率比		$[0, 1]$	0.145
coupling_ring_tm_down TM模下臂耦合功率比		$[0, 1]$	0.145
reffreq 参考频率	Hz	$(0, \infty)$	1.931e14
n_gv_te TE模群折射率		$(0, \infty)$	4.2
n_gv_tm TM模群折射率		$(0, \infty)$	4.2
disper_te TE模色散	$s \cdot m^{-2}$		0
disper_tm TM模色散	$s \cdot m^{-2}$		0

理论

该模型为不含电压输入的基本光分插滤波器，支持TE模或TM模传播，不支持同时传播及模式耦合。对于一种模式，光信号的变化由下述矩阵控制：

$$\begin{bmatrix} E_{\text{out1}} \\ E_{\text{out2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{1,1} & T_{1,2} \\ T_{2,1} & T_{2,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\text{in1}} \\ E_{\text{in2}} \end{bmatrix} \quad (249)$$

式中：

$$T_{1,2}(f) = T_{2,1}(f) = \frac{\kappa^{\text{up}} \kappa^{\text{low}} \cdot \exp(j\theta/2)}{t^{\text{up}} t^{\text{low}} - \exp(j\theta)} \cdot \exp\left\{-j\tilde{\beta}^{\text{bus}} L_{\text{bus}}\right\} \quad (250)$$

$$T_{1,1}(f) = \frac{t^{\text{up}} - t^{\text{low}} \exp(j\theta)}{t^{\text{up}} t^{\text{low}} - \exp(j\theta)} \cdot \exp\left\{-j\tilde{\beta}^{\text{bus}} L_{\text{bus}}\right\} \quad (251)$$

$$T_{2,2}(f) = \frac{t^{\text{low}} - t^{\text{up}} \exp(j\theta)}{t^{\text{up}} t^{\text{low}} - \exp(j\theta)} \cdot \exp\left\{-j\tilde{\beta}^{\text{bus}} L_{\text{bus}}\right\} \quad (252)$$

其中，

$$\theta = \tilde{\beta}^{\text{ring}} L_{\text{ring}} - \delta\phi \quad (253)$$

$$\kappa^{\text{up,low}} = \sqrt{K^{\text{up,low}}} \quad (254)$$

$$t^{\text{up,low}} = \sqrt{1 - K^{\text{up,low}}} \quad (255)$$

式中， L_{bus} 为直波导的长度， L_{ring} 为微环的周长（可由半径求得）， $\kappa^{\text{up,low}}$ 为上臂或下臂的耦合系数， $K^{\text{up,low}}$ 为上臂或下臂的耦合功率比。

传播系数 $\tilde{\beta}(f)$ 由下式定义：

$$\tilde{\beta}(f) = \frac{2\pi f_0}{c} \cdot n_{\text{eff}}(f_0) + \frac{2\pi}{c} \cdot n_{\text{gr}}(f_0) \cdot (f - f_0) - \frac{\pi c \cdot D(f_0)}{f_0^2} \cdot (f - f_0)^2 - \frac{j}{2} \alpha \quad (256)$$

式中， f_0 为参考频率， n_{eff} 为有效折射率， n_{gr} 为群折射率， α 为衰减， D 为色散。对于 $\tilde{\beta}_{\text{up}}(f)$ 和 $\tilde{\beta}_{\text{low}}(f)$ ，将对应折射率及色散代入即可。

示例

使用的原理图如图48所示。使用电压源V0、V1、V2控制理想光源的输出功率、相位和波长。测量光分插滤波器的光输出端口即可获得该调制器的工作情况。使用该原理图进行不同波长下光功率变化，可得到图49中的结果。

对比

我们使用文献^[1]中的数据，对基本光分插滤波器输出光功率随波长的变化进行了对比，结果如图50所示。

参考文献

- [1] MING D, WANG Y, WANG Z, et al. EPHIC Models: General SPICE Photonic Models for Closed-Loop Electronic-Photonic Co-Simulation[J/OL]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2024: 1-13[2024-02-26]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10431798/>. DOI: 10.1109/TCSI.2024.3353459.

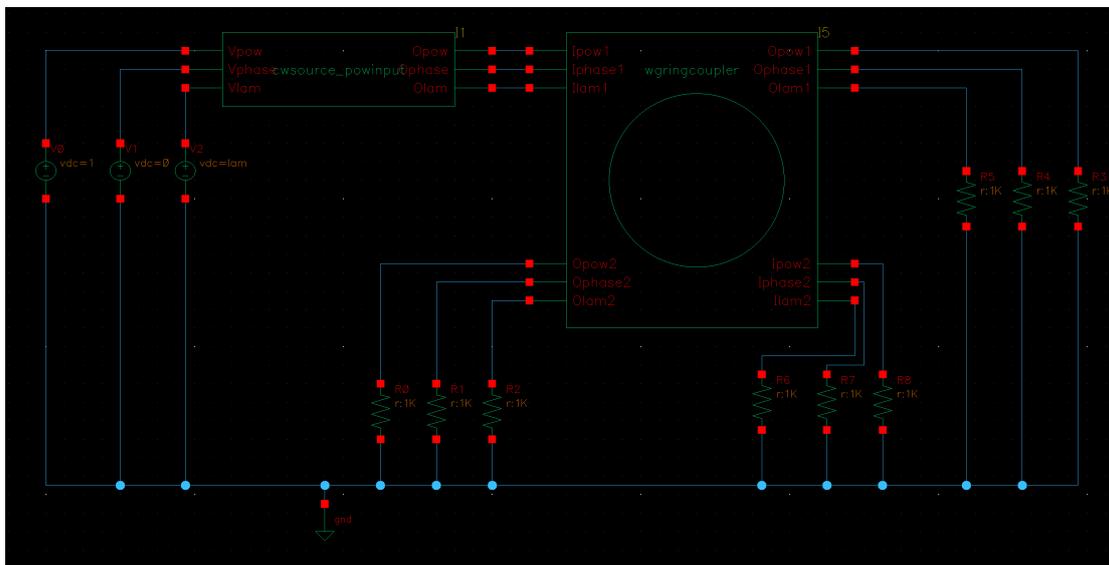


图 48: 基本光分插滤波器仿真原理图

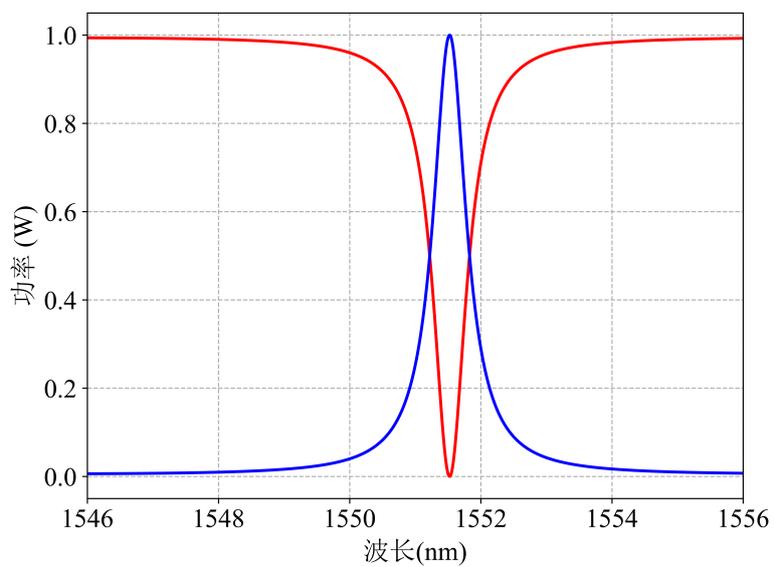


图 49: 基本光分插滤波器的光输出随波长的变化

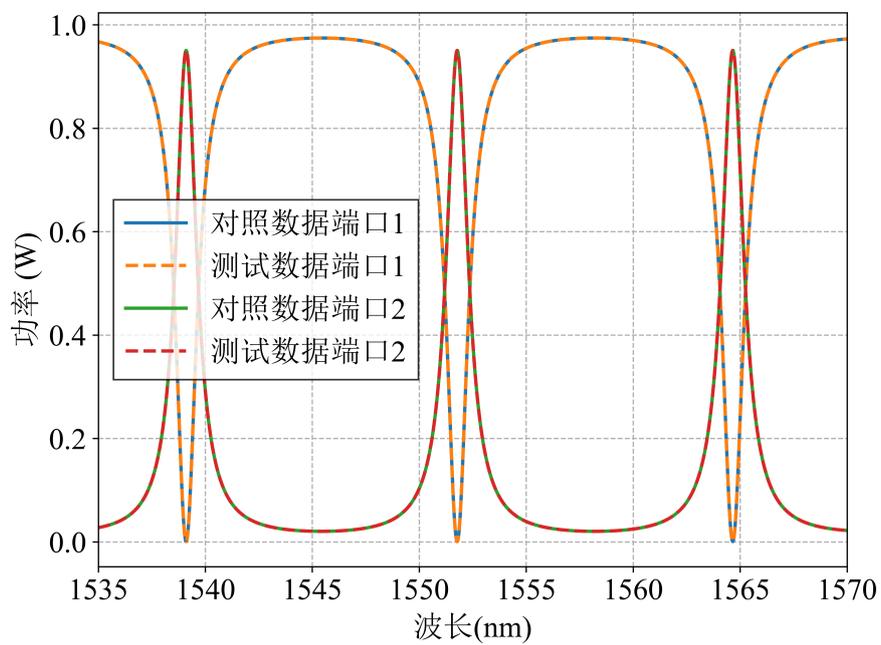
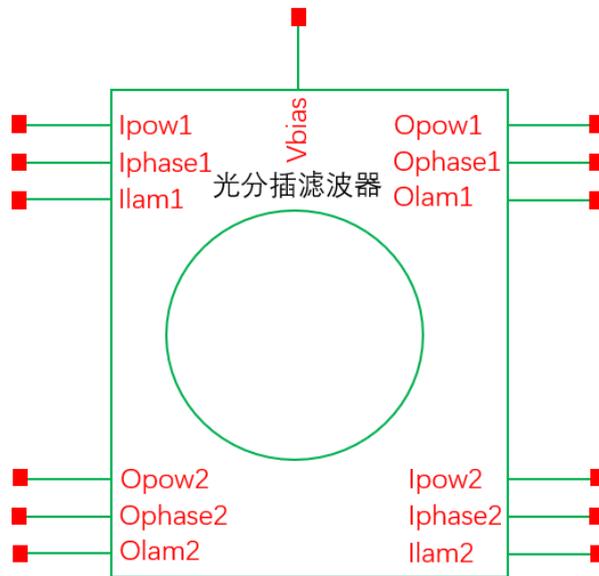


图 50: 基本光分插滤波器输出光功率随波长的变化结果对比

7.6 基本光分插滤波器（含电压）

模型样式



端口

	端口名称	描述
电学端口	Vbias	偏压输入
光学端口	Ipow1	输入端口1功率输入
	Iphase1	输入端口1相位输入
	Ilam1	输入端口1波长输入
	Ipow2	输入端口2功率输入
	Iphase2	输入端口2相位输入
	Ilam2	输入端口2波长输入
	Opow1	输出端口1功率输出
	Ophase1	输出端口1相位输出
	Olam1	输出端口1波长输出
	Opow2	输出端口2功率输出
	Ophase2	输出端口2相位输出
	Olam2	输出端口2波长输出

参数

参数	单位	值域	典型值
modespec 模式类型，1为TE模，2为TM模	不适用	1,2	1
alpha_use_dBm 衰减单位，0为 m^{-1} ，1为dB/m	不适用	0,1	1

参数	单位	值域	典型值
l_bus 直波导长度	m	[0,∞)	1e-3
r_ring 微环半径	m	[0,∞)	7.5e-6
phasedelay_bus_te 直波导TE模相移	°		0
phasedelay_bus_tm 直波导TM模相移	°		0
phasedelay_ring_te 微环TE模相移	°		0
phasedelay_ring_tm 微环TM模相移	°		0
read_neff 读取有效折射率文件，1为读取，0为不读取		0,1	1
file_neff_bus_te TE模直波导折射率文件路径	不适用		
file_neff_bus_tm TM模直波导折射率文件路径	不适用		
file_neff_ring_te TE模微环折射率文件路径	不适用		
file_neff_ring_tm TM模微环折射率文件路径	不适用		
file_deltaneff_te TE模折射率随电压变化文件路径	不适用		
file_deltaneff_tm TM模折射率随电压变化文件路径	不适用		
neff_bus_te TE模直波导折射率（未读取文件时使用）		(0,∞)	2.6
neff_bus_tm TM模直波导折射率（未读取文件时使用）		(0,∞)	2.6
neff_ring_te TE模微环折射率（未读取文件时使用）		(0,∞)	2.6
neff_ring_tm TM模微环折射率（未读取文件时使用）		(0,∞)	2.6
attenu_bus_te 直波导TE模衰减 (未读取文件时使用，单位受alpha_use_dBm控制)	m ⁻¹ 或dB/m	[0,∞)	0 dB/m
attenu_bus_tm 直波导TM模衰减 (未读取文件时使用，单位受alpha_use_dBm控制)	m ⁻¹ 或dB/m	[0,∞)	0 dB/m

参数	单位	值域	典型值
attenu_ring_te 微环TE模衰减 (未读取文件时使用, 单位受alpha_use_dBm控制)	m^{-1} 或dB/m	$[0, \infty)$	0 dB/m
attenu_ring_tm 微环TM模衰减 (未读取文件时使用, 单位受alpha_use_dBm控制)	m^{-1} 或dB/m	$[0, \infty)$	0 dB/m
delta_neff_perv_te TE模折射率随电压变化 (未读取文件时使用)			0
delta_neff_perv_tm TM模折射率随电压变化 (未读取文件时使用)			0
delta_attenu_perv_te TE模衰减随电压变化 (未读取文件时使用, 单位受alpha_use_dBm控制)	m^{-1} 或dB/m		0 dB/m
delta_attenu_perv_tm TM模衰减随电压变化 (未读取文件时使用, 单位受alpha_use_dBm控制)	m^{-1} 或dB/m		0 dB/m
reffreq 参考频率	Hz	$(0, \infty)$	1.931e14
n_gv_bus_te TE模直波导群折射率		$(0, \infty)$	4.2
n_gv_bus_tm TM模直波导群折射率		$(0, \infty)$	4.2
n_gv_ring_te TE模微环群折射率		$(0, \infty)$	4.2
n_gv_ring_tm TM模微环群折射率		$(0, \infty)$	4.2
disper_bus_te TE模直波导色散			0
disper_bus_tm TM模直波导色散			0
disper_ring_te TE模微环色散			0
disper_ring_tm TM模微环色散			0
read_coupling_ring 读取耦合功率比文件, 1为读取, 0为不读取		0,1	0
coupling_ring_te_up TE模上臂耦合功率比 (未读取文件时使用)		$[0,1]$	0.145
coupling_ring_tm_up TM模上臂耦合功率比 (未读取文件时使用)		$[0,1]$	0.145

参数	单位	值域	典型值
coupling_ring_te_down TE模下臂耦合功率比（未读取文件时使用）		[0,1]	0.145
coupling_ring_tm_down TM模下臂耦合功率比（未读取文件时使用）		[0,1]	0.145
file_coupling_ring_te_up TE模上臂耦合功率比文件路径	不适用		
file_coupling_ring_tm_up TM模上臂耦合功率比文件路径	不适用		
file_coupling_ring_te_down TE模下臂耦合功率比文件路径	不适用		
file_coupling_ring_tm_down TM模下臂耦合功率比文件路径	不适用		

理论

该模型为含电压输入的基本光分插滤波器，支持TE模或TM模传播，不支持同时传播及模式耦合。对于一种模式，光信号的变化由下述矩阵控制：

$$\begin{bmatrix} E_{out1} \\ E_{out2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{1,1} & T_{1,2} \\ T_{2,1} & T_{2,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{in1} \\ E_{in2} \end{bmatrix} \quad (257)$$

式中：

$$T_{1,2}(f) = T_{2,1}(f) = \frac{\kappa^{up} \kappa^{low} \cdot \exp(j\theta/2)}{t^{up} t^{low} - \exp(j\theta)} \cdot \exp\{-j\tilde{\beta}^{bus} L_{bus}\} \quad (258)$$

$$T_{1,1}(f) = \frac{t^{up} - t^{low} \exp(j\theta)}{t^{up} t^{low} - \exp(j\theta)} \cdot \exp\{-j\tilde{\beta}^{bus} L_{bus}\} \quad (259)$$

$$T_{2,2}(f) = \frac{t^{low} - t^{up} \exp(j\theta)}{t^{up} t^{low} - \exp(j\theta)} \cdot \exp\{-j\tilde{\beta}^{bus} L_{bus}\} \quad (260)$$

其中，

$$\theta = \tilde{\beta}^{ring} L_{ring} - \delta\phi \quad (261)$$

$$\kappa^{up,low} = \sqrt{K^{up,low}} \quad (262)$$

$$t^{up,low} = \sqrt{1 - K^{up,low}} \quad (263)$$

式中， L_{bus} 为直波导的长度， L_{ring} 为微环的周长（可由半径求得）， $\kappa^{up,low}$ 为上臂或下臂的耦合系数， $K^{up,low}$ 为上臂或下臂的耦合功率比。

耦合功率比的大小和光信号的波长有关。在本模型中，通过读取包含波长和耦合功率比的文件并进行拟合来获得当前微环的耦合功率比。

电压对微环的影响主要体现在复折射率的变化上，而复折射率的虚部确定了器件的光衰减，因此该模型仅读取0V时的复折射率和复折射率随电压的变化即可直接获得有效折射率和光衰减的数值。由此可求得传播常数 $\tilde{\beta}(f)$ ：

$$\tilde{\beta}(f) = \frac{2\pi f}{c} \cdot n_{eff}(f) - \frac{j}{2}\alpha \quad (264)$$

该模型也可通过输入对应的参数，通过一次函数的形式来反映电压对折射率的变化。此时，该模型的理论方案和无电压端口的基本微环调制器一致。

输入文件格式

耦合功率比

耦合功率比由变量`file_coupling_ring_te_up`（TE模上臂）、`file_coupling_ring_te_down`（TE模下臂）、`file_coupling_ring_tm_up`（TM模上臂）、`file_coupling_ring_tm_down`（TM模下臂）定义的文件决定。该文件第一行表达了文件中数据点的数量，后续部分为两列，第一列为波长（单位为m），第二列为对应的耦合功率比。

复折射率

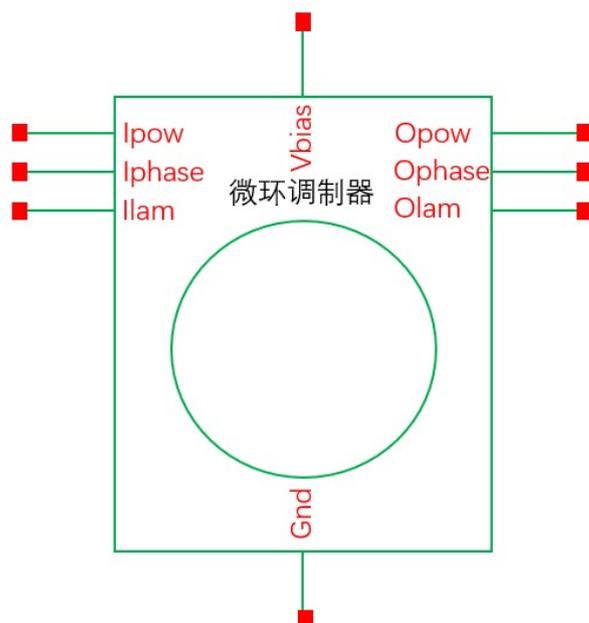
直波导的复折射率由变量`file_neff_bus_te`（TE模）和`file_neff_bus_tm`（TM模）定义的文件决定。微环的复折射率由变量`file_neff_ring_te`（TE模）和`file_neff_ring_tm`（TM模）定义的文件决定。该文件第一行表达了文件中数据点的数量，后续部分为三列，第一列为电压（单位为V），第二列为对应的折射率实部，第三列为对应的折射率虚部。

复折射率随电压的变化

复折射率随电压的变化由变量`file_deltanreff_te`（TE模）和`file_deltanreff_tm`（TM模）定义的文件决定。该文件第一行表达了文件中数据点的数量，后续部分为三列，第一列为电压（单位为V），第二列为对应的折射率实部的变化值，第三列为对应的折射率虚部的变化值。

7.7 含折射率变化的微环调制器

模型样式



端口

	端口名称	描述
电学端口	Vbias	偏压输入
光学端口	Ipow	功率输入
	Iphase	相位输入
	Ilam	波长输入
	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出
接地	Gnd	接地

参数

参数	单位	值域	典型值
r 微环半径	m	$(0, \infty)$	1e-5
phaseshift_ratio 微环相移比		$(0, 1)$	0.8407
nref_coupler 耦合器折射率		$(0, \infty)$	3.02
kappa_coupler 耦合系数		$(0, \infty)$	2.15e6

参数	单位	值域	典型值
l_coupler 耦合长度	m	(0,∞)	1e-7
alpha_phaseshift_ref 微环基本衰减	m ⁻¹	(0,∞)	80
alpha_absorp 吸收校正系数		(0,∞)	1
alpha_wd 扩散宽度校正系数		(0,∞)	1
rib_width 脊形波导宽度	m	(0,∞)	4e-7
pn_offset PN结偏移调整系数		[0,∞)	0
ni 本征载流子浓度	m ⁻³	(0,∞)	1e16
N_A 受主浓度	m ⁻³	(0,∞)	5e23
N_D 施主浓度	m ⁻³	(0,∞)	1e24
Lp 空穴扩散长度	m	(0,∞)	2e-6
Ln 电子扩散长度	m	(0,∞)	1e-6
epsr_Si 硅的相对介电常数			11.7
Is 稳态电流	A	(0,∞)	1e-14
IBV 反向击穿电流	A	(0,∞)	1000u
BV 反向击穿电压	V	(0,∞)	40
V0 发射系数	V	[0,∞)	1
Cj0 零偏结电容	F	[0,∞)	1.5e-12
tau 注入寿命	s	(0,∞)	5e-10
Rs 串联电阻	Ω	(0,∞)	55
emi 辐射系数		(0,∞)	1

参数	单位	值域	典型值
Vt 热电压	V	(0,∞)	0.0259
neff_ps_filename 相移折射率文件位置	不适用		
neff_wg_filename 波导折射率文件位置	不适用		

理论

该模型基于文献^[1]搭建。该模型由一个耦合器和一个由电压和折射率控制的相移器及环形波导（代替微环结构）组成。该模型的光输入输出变化如下：

$$\begin{bmatrix} E_{out} \\ E_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t & \kappa \\ -\kappa^* & -t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{in} \\ pE_1 \end{bmatrix} \quad (265)$$

式中，中间的矩阵表达了耦合器对光的影响。其中 κ 为耦合系数， t 为传播系数，二者表达式如下：

$$\kappa = j \sin(k_{ab}l_{cp}) \cdot \exp(jl_{cp}\beta_{cp}) \quad (266)$$

$$t_{cp} = \cos(k_{ab}l_{cp}) \cdot \exp(jl_{cp}\beta_{cp}) \quad (267)$$

式中， k_{ab} 为参数表中的耦合系数， l_{cp} 为耦合器的长度， β_{cp} 为耦合器的传播常数，由下式给出：

$$\beta_{cp} = \frac{2\pi n_{cp}}{\lambda} \quad (268)$$

式中 n_{cp} 为耦合器的折射率。

加电压的相移器及环形波导对光的影响由 p 表达，该值受相移器耦合系数 κ_{ps} 和波导耦合系数 κ_{wg} 的共同影响，其表达式如下：

$$p = \exp(2\pi r d \kappa_{ps} + 2\pi r (1 - d) \kappa_{wg}) \quad (269)$$

其中 d 为相移器在整个微环周长中的长度占比。

相移器耦合系数 κ_{ps} 由下式给出：

$$\kappa_{ps} = -\alpha_{ps} \cdot \alpha_{abs} + j\beta_{ps} \quad (270)$$

式中 α_{ps} 代表了相移器的内部损耗， α_{abs} 为调整参数， β_{ps} 为传播常数，表达式如下：

$$\beta_{ps} = \frac{2\pi n_{eff,ps}}{\lambda} \quad (271)$$

式中， $n_{eff,ps}$ 为相移器的有效折射率。

为了计算相移器内部损耗并反映折射率随电压的变化，需要计算载流子浓度分布。该模型在电学部分采用了PN结模型，PN结中的载流子浓度分布如下：

$$p_n(x, V) = p_{n0} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \exp\left(-\frac{x - W_{Dn}}{L_p}\right) + p_{n0} \quad (272)$$

$$n_p(x, V) = n_{p0} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \exp\left(-\frac{x - W_{Dp}}{L_n}\right) + n_{p0} \quad (273)$$

式中, p_n 和 n_p 分别是N区和P区的空穴和电子浓度, L_p 和 L_n 分别是空穴和电子的扩散长度, p_{n0} 和 n_{p0} 是初始浓度, 等于热平衡中的 n_i^2/N_D 和 n_i^2/N_A , N_A 和 N_D 分别为P区施主浓度和N区受主浓度, W_{Dn} 和 W_{Dp} 表达了N区和P区的耗尽宽度, 其表达式如下:

$$W_{Dp} = \frac{N_D \cdot W}{N_A + N_D} \quad (274)$$

$$W_{Dn} = \frac{N_A \cdot W}{N_A + N_D} \quad (275)$$

式中,

$$W = \alpha_{wd} \cdot \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{inj}}{q \cdot N_{avr}}} \quad (276)$$

其中, α_{wd} 为扩散宽度校正系数, ε 为介电常数, N_{avr} 的表达式如下:

$$N_{avr} = N_A \cdot N_D / (N_A + N_D) \quad (277)$$

V_{inj} 的表达式如下:

$$V_{inj} = \frac{kT}{q} \log_{10} \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) - V(t) \quad (278)$$

式中, $V(t)$ 为驱动电压。

脊波导区域内某一点的损耗变化如下:

$$\Delta\alpha = n_p \sigma_{ae} + p_n \sigma_{ah} \quad (279)$$

式中, σ_{ae} 和 σ_{ah} 都是和材料及波长有关的参数。在整个脊波导范围内求平均值即可得到由外加电压导致的损耗变化 $\Delta\alpha_{ps,avg}$ 。相移器总内部损耗由下式给出:

$$\alpha_{ps} = \alpha_{ps,ref} + \Delta\alpha_{ps,avg} \quad (280)$$

式中, $\alpha_{ps,ref}$ 为无偏压下相移器的损耗。

驱动电压的等效电路模型如下:

$$V'(t) = \left[C(V(t)) \frac{dV(t)}{dt} + I_D(t) \right] \cdot R_S + V(t) \quad (281)$$

式中, $V'(t)$ 为加载到调制器上的电压, R_S 为串联电阻, $C(V(t))$ 为电容, 由结电容 C_J 和扩散电容 C_D 组成, 二者的表达式如下:

$$C_J = \frac{C_J(0)}{\sqrt{1 - V(t)/V_0}} \quad (282)$$

$$C_D = \frac{I_D(t)\tau}{nV_t} \quad (283)$$

上述各式中, $C_J(0)$ 为零偏结电压, V_0 为结电势, n 为辐射系数, V_t 为热电压, τ 为注入寿命。 $I_D(t)$ 二极管的总电流, 由下式给出:

$$I_D(t) = I_S \left[\exp\left(\frac{V(t)}{nV_t}\right) - 1 \right] + V(t)g_D \quad (284)$$

式中, I_S 为稳态电流, 缩放因子 g_D 由下式给出:

$$g_D = \frac{IBV - I_S \cdot (\exp(5) - 1)}{BV - 5n \cdot V_t} \quad (285)$$

式中 BV 、 IBV 为相关参数。

波导耦合系数 κ_{wg} 由下式给出：

$$\kappa_{wg} = -\alpha_{wg} + j\beta_{wg} \quad (286)$$

式中， α_{wg} 为波导的光损耗， β_{wg} 为波导部分的传播常数，由下式给出：

$$\beta_{wg} = \frac{2\pi n_{wg}}{\lambda} \quad (287)$$

式中， n_{wg} 为波导的折射率。

输入文件格式

相移器折射率随波长及P区耗尽宽度变化

相移器折射率随波长及P区耗尽宽度变化由变量`neff_ps_filename`定义的文件决定。该文件格式如下：

W_{D_p} 起始值	W_{D_p} 结束值	W_{D_p} 采样数m		
波长起始值	波长结束值	波长采样数n		
数据1	数据2	数据3	...	数据n
数据n+1	数据n+2	数据n+3	...	数据2n
...
数据(m-1)×n+1	数据(m-1)×n+2	数据(m-1)×n+3	...	数据m×n

该文件中每一行的 W_{D_p} 相同，每一列的波长相同。模型将使用插值方式获得所需数据点对应的折射率。若当前数据点超出数据文件的范围，模型将弹出警告。

波导折射率随波长变化

波导折射率随波长变化由变量`neff_wg_filename`定义的文件决定。该文件格式如下：

波长起始值	波长结束值	波长采样数n		
数据1	数据2	数据3	...	数据n

模型将使用插值方式获得所需数据点对应的折射率。若当前数据点超出数据文件的范围，模型将弹出警告。

示例

使用的原理图如图51所示。使用电压源V2、V1、V0控制理想光源的输出功率、相位和波长。使用开关S0控制输入的电信号，即由V3产生的恒定信号或由随机信号发生器I4产生的随机码信号。测量微环调制器的光输出端口即可获得该调制器的工作情况。使用该原理图进行不同波长下光功率变化和眼图仿真，可得到图52和53中的结果。

对比

我们使用文献^[1]中的数据，对含折射率变化的微环调制器输出光功率随波长的变化进行了对比，结果如图54所示。

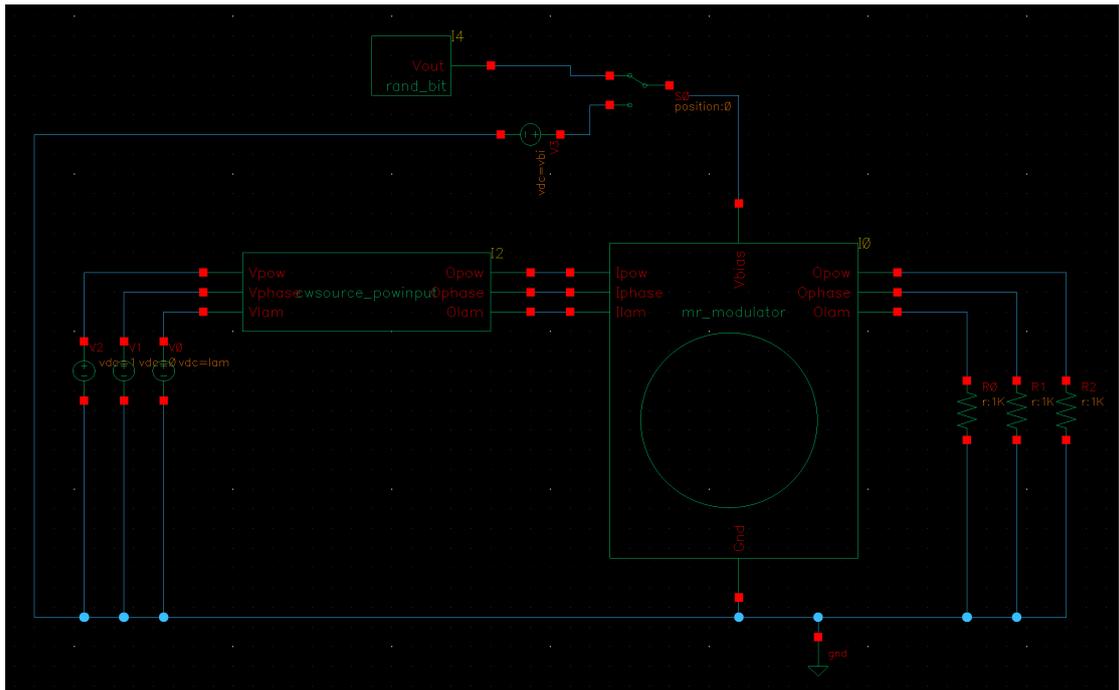


图 51: 含折射率变化的微环调制器仿真原理图

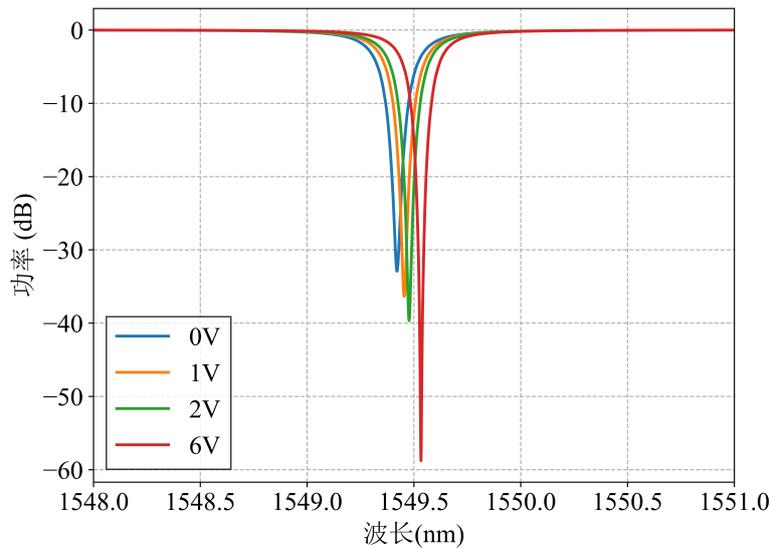


图 52: 含折射率变化的微环调制器的光输出随波长的变化

参考文献

- [1] CHEN X, WANG Z, CHANG Y S, et al. Modeling and Analysis of Optical Modulators Based on Free-Carrier Plasma Dispersion Effect[J/OL]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2020, 39(5): 977-990[2024-01-08]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8675505/>. DOI: 10.1109/TCAD.2019.2907907.

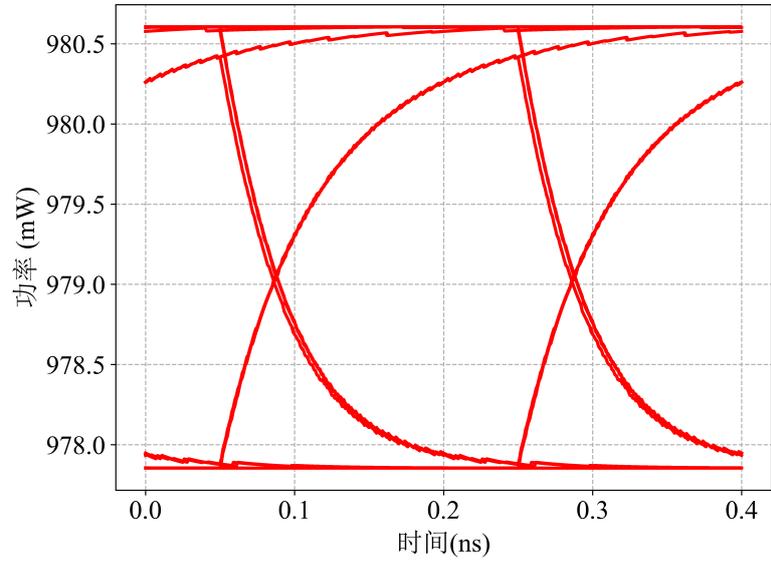


图 53: 含折射率变化的微环调制器眼图仿真结果

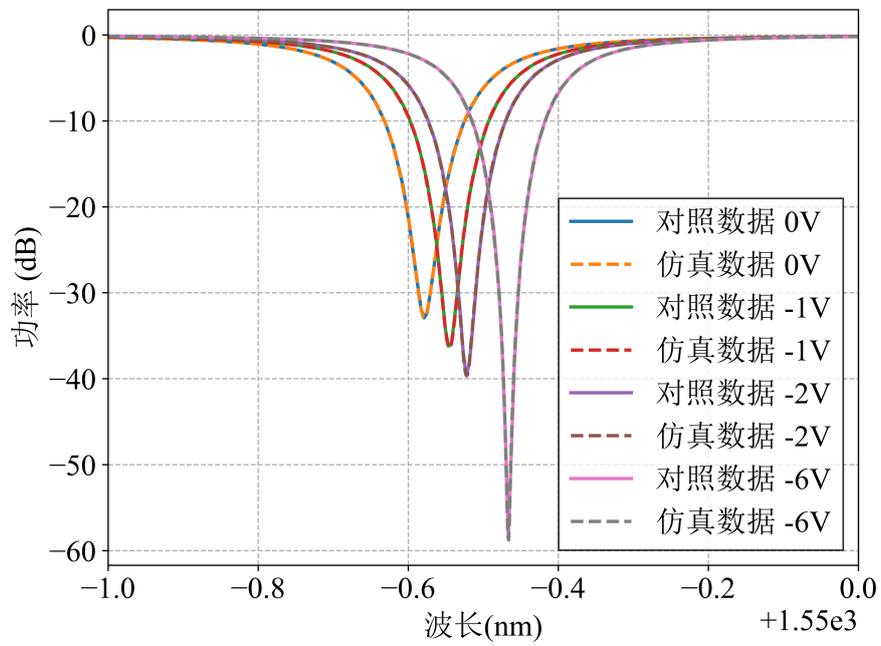
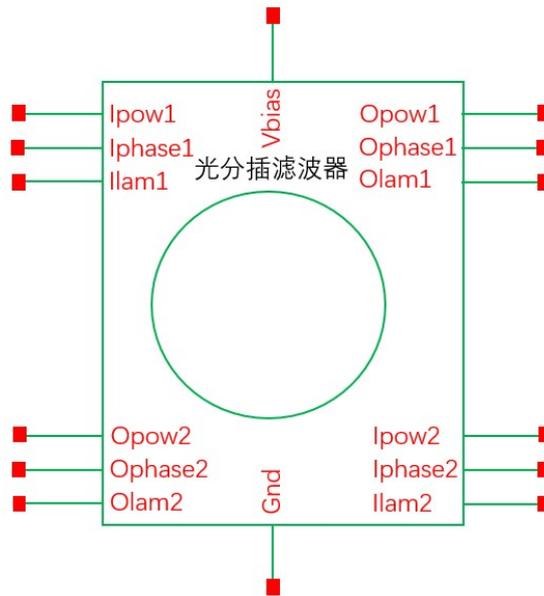


图 54: 含折射率变化的微环调制器输出光功率随波长的变化结果对比

7.8 含折射率变化的光分插滤波器

模型样式



端口

	端口名称	描述
电学端口	Vbias	偏压输入
光学端口	Ipow1	输入端口1功率输入
	Iphase1	输入端口1相位输入
	Ilam1	输入端口1波长输入
	Ipow2	输入端口2功率输入
	Iphase2	输入端口2相位输入
	Ilam2	输入端口2波长输入
	Opow1	输出端口1功率输出
	Ophase1	输出端口1相位输出
	Olam1	输出端口1波长输出
	Opow2	输出端口2功率输出
Ophase2	输出端口2相位输出	
Olam2	输出端口2波长输出	
接地	Gnd	接地

参数

参数	单位	值域	典型值
r 微环半径	m	$(0, \infty)$	1e-5

参数	单位	值域	典型值
phaseshift_ratio 微环相移比		(0,1)	0.8407
nref_coupler 耦合器折射率		(0,∞)	3.02
kappa_coupler 耦合系数		(0,∞)	2.15e6
l_coupler 耦合长度	m	(0,∞)	1e-7
alpha_phaseshift_ref 微环基本衰减	m ⁻¹	(0,∞)	80
alpha_absorp 吸收校正系数		(0,∞)	1
alpha_wd 扩散宽度校正系数		(0,∞)	1
rib_width 脊形波导宽度	m	(0,∞)	4e-7
pn_offset PN结偏移调整系数		[0,∞)	0
ni 本征载流子浓度	m ⁻³	(0,∞)	1e16
N_A 受主浓度	m ⁻³	(0,∞)	5e23
N_D 施主浓度	m ⁻³	(0,∞)	1e24
Lp 空穴扩散长度	m	(0,∞)	2e-6
Ln 电子扩散长度	m	(0,∞)	1e-6
epsr_Si 硅的相对介电常数			11.7
Is 稳态电流	A	(0,∞)	1e-14
IBV 反向击穿电流	A	(0,∞)	1000u
BV 反向击穿电压	V	(0,∞)	40
V0 发射系数	V	[0,∞)	1
Cj0 零偏结电容	F	[0,∞)	1.5e-12

参数	单位	值域	典型值
tau 注入寿命	s	(0,∞)	5e-10
Rs 串联电阻	Ω	(0,∞)	55
emi 辐射系数		(0,∞)	1
Vt 热电压	V	(0,∞)	0.0259
neff_ps_filename 相移折射率文件位置	不适用		
neff_wg_filename 波导折射率文件位置	不适用		

理论

该模型基于文献^[1]搭建。该模型由两个耦合器和一个由电压和折射率控制的相移器及环形波导（代替微环结构）组成。该模型的光输入输出变化如下：

$$\begin{bmatrix} E_{out1} \\ E_{out2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{1,1} & T_{1,2} \\ T_{2,1} & T_{2,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{in1} \\ E_{in2} \end{bmatrix} \quad (288)$$

式中：

$$T_{1,1} = T_{2,2} = t + \frac{tp^2\kappa^2}{1-t^2p^2} \quad (289)$$

$$T_{1,2} = T_{2,1} = \frac{p\kappa^2}{1-t^2p^2} \quad (290)$$

其中 κ 为耦合系数， t 为传播系数，二者表达式如下：

$$\kappa = j \sin(k_{ab}l_{cp}) \cdot \exp(jl_{cp}\beta_{cp}) \quad (291)$$

$$t_{cp} = \cos(k_{ab}l_{cp}) \cdot \exp(jl_{cp}\beta_{cp}) \quad (292)$$

式中， k_{ab} 为参数表中的耦合系数， l_{cp} 为耦合器的长度， β_{cp} 为耦合器的传播常数，由下式给出：

$$\beta_{cp} = \frac{2\pi n_{cp}}{\lambda} \quad (293)$$

式中 n_{cp} 为耦合器的折射率。

加电压的相移器及环形波导对光的影响由 p 表达，该值受相移器耦合系数 κ_{ps} 和波导耦合系数 κ_{wg} 的共同影响，其表达式如下：

$$p = \exp(\pi r d \kappa_{ps} + \pi r (1-d) \kappa_{wg}) \quad (294)$$

其中 d 为相移器在整个微环周长中的长度占比。

相移器耦合系数 κ_{ps} 由下式给出:

$$\kappa_{ps} = -\alpha_{ps} \cdot \alpha_{abs} + j\beta_{ps} \quad (295)$$

式中 α_{ps} 代表了相移器的内部损耗, α_{abs} 为调整参数, β_{ps} 为传播常数, 表达式如下:

$$\beta_{ps} = \frac{2\pi n_{eff,ps}}{\lambda} \quad (296)$$

式中, $n_{eff,ps}$ 为相移器的有效折射率。

为了计算相移器内部损耗并反映折射率随电压的变化, 需要计算载流子浓度分布。该模型在电学部分采用了PN结模型, PN结中的载流子浓度分布如下:

$$p_n(x, V) = p_{n0} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \exp\left(-\frac{x - W_{Dn}}{L_p}\right) + p_{n0} \quad (297)$$

$$n_p(x, V) = n_{p0} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \exp\left(-\frac{x - W_{Dp}}{L_n}\right) + n_{p0} \quad (298)$$

式中, p_n 和 n_p 分别是N区和P区的空穴和电子浓度, L_p 和 L_n 分别是空穴和电子的扩散长度, p_{n0} 和 n_{p0} 是初始浓度, 等于热平衡中的 n_i^2/N_D 和 n_i^2/N_A , N_A 和 N_D 分别为P区施主浓度和N区受主浓度, W_{Dn} 和 W_{Dp} 表达了N区和P区的耗尽宽度, 其表达式如下:

$$W_{Dp} = \frac{N_D \cdot W}{N_A + N_D} \quad (299)$$

$$W_{Dn} = \frac{N_A \cdot W}{N_A + N_D} \quad (300)$$

式中,

$$W = \alpha_{wd} \cdot \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{inj}}{q \cdot N_{avr}}} \quad (301)$$

其中, α_{wd} 为扩散宽度校正系数, ε 为介电常数, N_{avr} 的表达式如下:

$$N_{avr} = N_A \cdot N_D / (N_A + N_D) \quad (302)$$

V_{inj} 的表达式如下:

$$V_{inj} = \frac{kT}{q} \log_{10} \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) - V(t) \quad (303)$$

式中, $V(t)$ 为驱动电压。

脊波导区域内某一点的损耗变化如下:

$$\Delta\alpha = n_p \sigma_{ae} + p_n \sigma_{ah} \quad (304)$$

式中, σ_{ae} 和 σ_{ah} 都是和材料及波长有关的参数。在整个脊波导范围内求平均值即可得到由外加电压导致的损耗变化 $\Delta\alpha_{ps,avg}$ 。相移器总内部损耗由下式给出:

$$\alpha_{ps} = \alpha_{ps,ref} + \Delta\alpha_{ps,avg} \quad (305)$$

式中, $\alpha_{ps,ref}$ 为无偏压下相移器的损耗。

驱动电压的等效电路模型如下:

$$V'(t) = \left[C(V(t)) \frac{dV(t)}{dt} + I_D(t) \right] \cdot R_S + V(t) \quad (306)$$

式中, $V'(t)$ 为加载到调制器上的电压, R_S 为串联电阻, $C(V(t))$ 为电容, 由结电容 C_J 和扩散电容 C_D 组成, 二者的表达式如下:

$$C_J = \frac{C_J(0)}{\sqrt{1 - V(t)/V_0}} \quad (307)$$

$$C_D = \frac{I_D(t)\tau}{nV_t} \quad (308)$$

上述各式中, $C_J(0)$ 为零偏结电压, V_0 为结电势, n 为辐射系数, V_t 为热电压, τ 为注入寿命。 $I_D(t)$ 二极管的总电流, 由下式给出:

$$I_D(t) = I_S \left[\exp\left(\frac{V(t)}{nV_t}\right) - 1 \right] + V(t)g_D \quad (309)$$

式中, I_S 为稳态电流, 缩放因子 g_D 由下式给出:

$$g_D = \frac{IBV - I_S \cdot (\exp(5) - 1)}{BV - 5n \cdot V_t} \quad (310)$$

式中 BV 、 IBV 为相关参数。

波导耦合系数 κ_{wg} 由下式给出:

$$\kappa_{wg} = -\alpha_{wg} + j\beta_{wg} \quad (311)$$

式中, α_{wg} 为波导的光损耗, β_{wg} 为波导部分的传播常数, 由下式给出:

$$\beta_{wg} = \frac{2\pi n_{wg}}{\lambda} \quad (312)$$

式中, n_{wg} 为波导的折射率。

输入文件格式

相移器折射率随波长及P区耗尽宽度变化

相移器折射率随波长及P区耗尽宽度变化由变量`neff_ps_filename`定义的文件决定。该文件格式如下:

W_{D_p} 起始值	W_{D_p} 结束值	W_{D_p} 采样数m		
波长起始值	波长结束值	波长采样数n		
数据1	数据2	数据3	...	数据n
数据n+1	数据n+2	数据n+3	...	数据2n
...
数据(m-1)×n+1	数据(m-1)×n+2	数据(m-1)×n+3	...	数据m×n

该文件中每一行的 W_{D_p} 相同, 每一列的波长相同。模型将使用插值方式获得所需数据点对应的折射率。若当前数据点超出数据文件的范围, 模型将弹出警告。

波导折射率随波长变化

波导折射率随波长变化由变量`neff_wg_filename`定义的文件决定。该文件格式如下:

波长起始值	波长结束值	波长采样数n		
数据1	数据2	数据3	...	数据n

模型将使用插值方式获得所需数据点对应的折射率。若当前数据点超出数据文件的范围, 模型将弹出警告。

示例

使用的原理图如图55所示。使用电压源V2、V1、V0控制理想光源的输出功率、相位和波长。使用开关S0控制输入的电信号，即由V3产生的恒定信号或由随机信号发生器I4产生的随机码信号。测量光分插滤波器的光输出端口即可获得该调制器的工作情况。使用该原理图进行不同波长下光功率变化和眼图仿真，可得到图56-58中的结果。

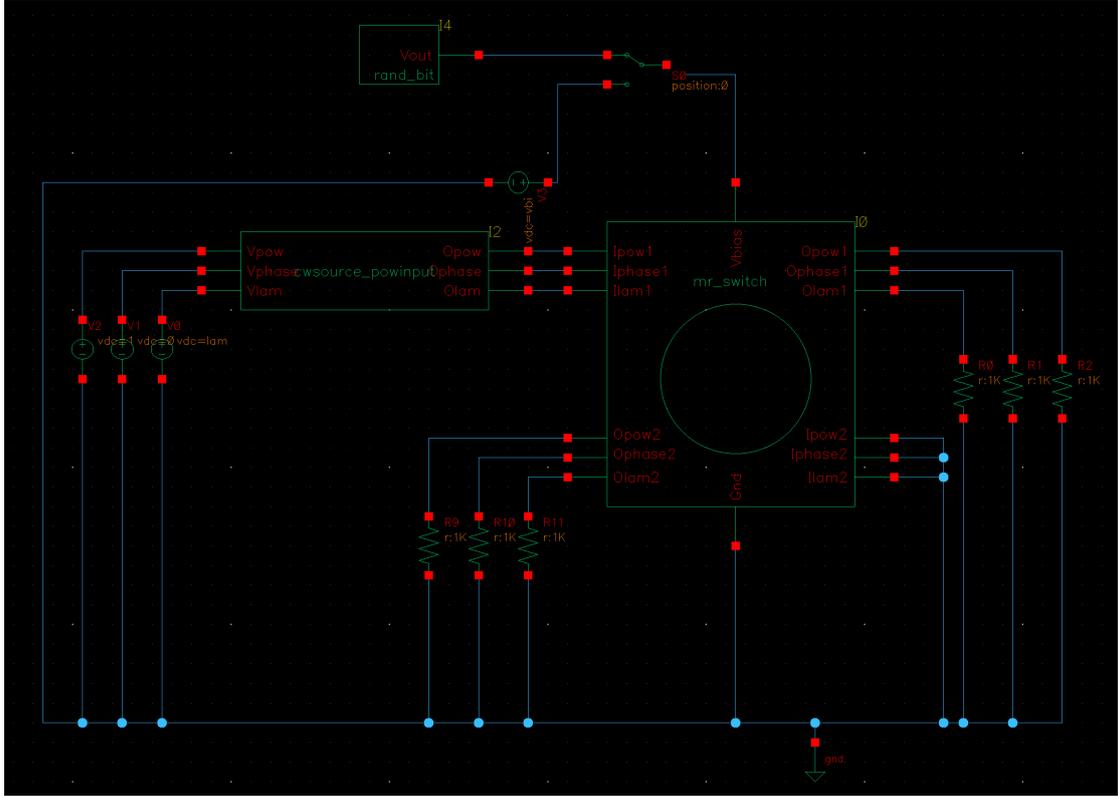


图 55: 含折射率变化的光分插滤波器仿真原理图

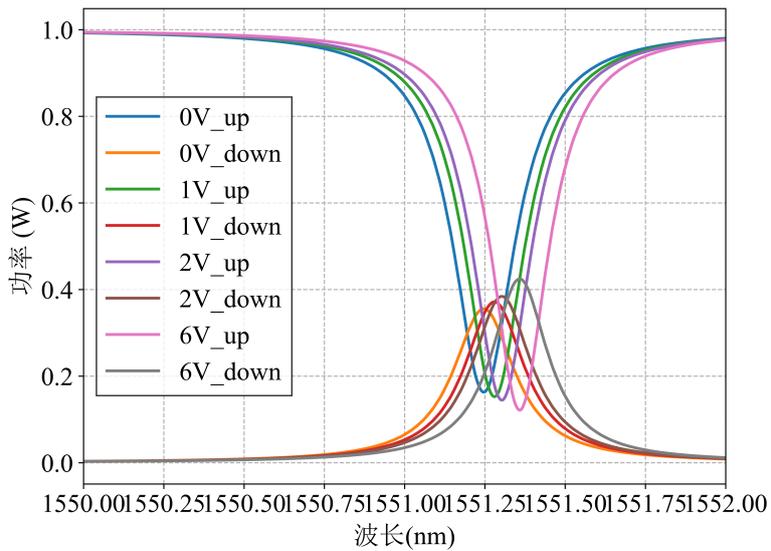


图 56: 含折射率变化的光分插滤波器的光输出随波长的变化

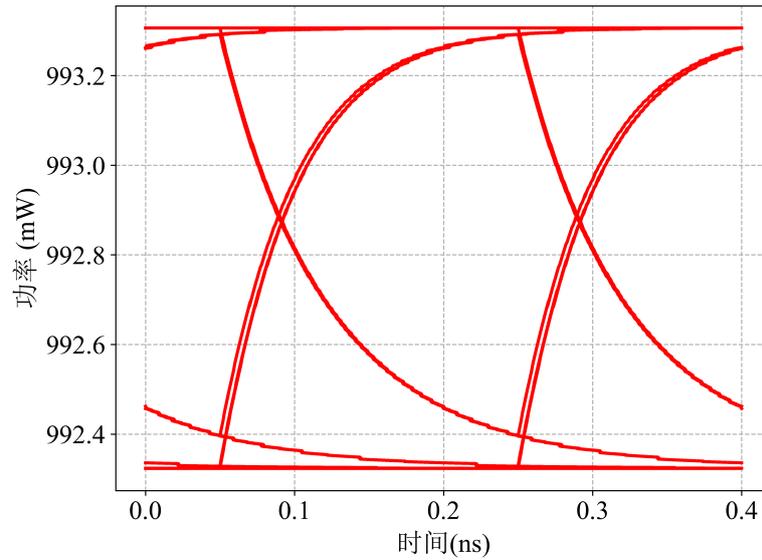


图 57: 含折射率变化的光分插滤波器眼图仿真结果 (上臂)

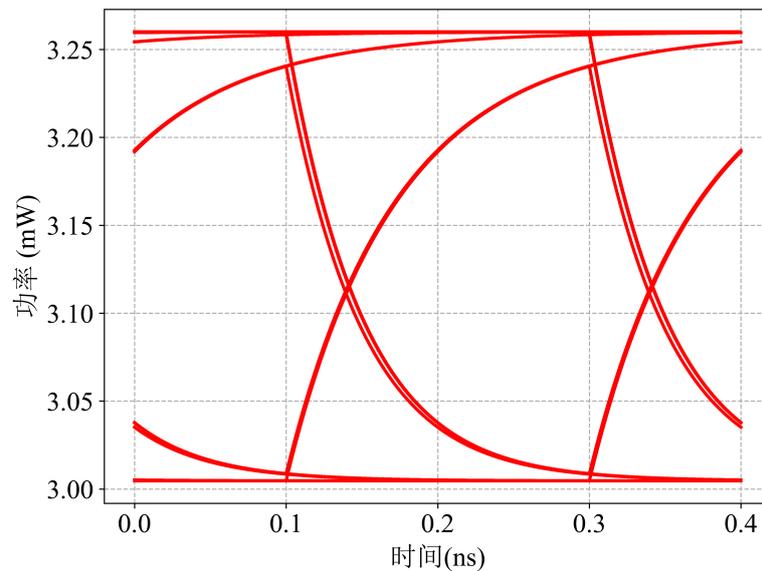


图 58: 含折射率变化的光分插滤波器眼图仿真结果 (下臂)

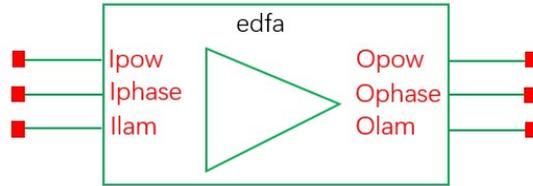
参考文献

- [1] CHEN X, WANG Z, CHANG Y S, et al. Modeling and Analysis of Optical Modulators Based on Free-Carrier Plasma Dispersion Effect[J/OL]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2020, 39(5): 977-990[2024-01-08]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8675505/>. DOI: 10.1109/TCAD.2019.2907907.

8 光放大器

8.1 EDFA光放大器

模型样式



端口

	端口名称	描述
光学端口	Ipow	功率输入
	Iphase	相位输入
	Ilam	波长输入
	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出

参数

参数	单位	值域	典型值
alpha_use_dBm 衰减单位, 0为 m^{-1} , 1为dB/m	不适用	0,1	1
length 掺铒光纤长度	m	(0, ∞)	6
sig_a 吸收截面	m^2	(0, ∞)	3.86e-25
sig_e 散射截面	m^2	(0, ∞)	4.27e-25
tau 铒离子寿命	s	(0, ∞)	10.0e-3
gamma 重叠系数		(0,1)	0.67
nEr 铒离子浓度	m^{-3}	(0, ∞)	2.5e24
beff 纤芯半径	m	(0, ∞)	1.5e-6
bgloss 本底损耗 (单位受alpha_use_dBm控制)	m^{-1} 或dB/m	[0, ∞)	0.03 dB/m

参数	单位	值域	典型值
bandwidth 自发辐射带宽	Hz	$[0, \infty)$	0

理论

该模型为EDFA光放大器模型，该模型不改变光的相位。现阶段该模型仅考虑单模单向光传输，其沿传播方向的功率变化如下：

$$\frac{dP}{dz} = [\sigma_e(f) f_2(z) - \sigma_a(f) f_1(z)] \Gamma \bar{n}_t P - \alpha P \quad (313)$$

式中， σ_a 为吸收截面， σ_e 为散射截面，这两个参数与光频率有关； \bar{n}_t 为铒离子浓度， α 为本底损耗。

自发辐射也会导致输出光功率的变化。放大自发辐射沿传播方向的功率变化如下：

$$\frac{dP^{\text{ase}}}{dz} = [\sigma_e(f) f_2(z) - \sigma_a(f) f_1(z)] \Gamma \bar{n}_t P^{\text{ase}} + \sigma_e(f) \Gamma \bar{n}_t f_2(z) m h f \Delta f - \alpha P^{\text{ase}} \quad (314)$$

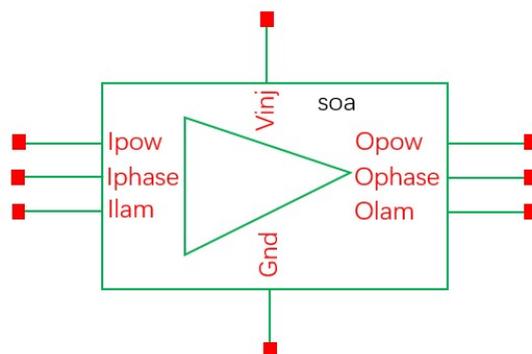
上述各式中 $f_2(z)$ 为反转电平， $f_1(z) = 1 - f_2(z)$ 。本模型使用有效重叠近似法计算 $f_2(z)$ ，其表达式由下式给出：

$$f_2(z) = \frac{\tau \frac{P^*}{\pi b_{\text{eff}}^2 h f} \Gamma \sigma_a(f)}{1 + \tau \frac{P^*}{\pi b_{\text{eff}}^2 h f} \Gamma (\sigma_a(f) + \sigma_e(f))} \quad (315)$$

式中， τ 是铒离子的寿命， b_{eff} 为有效半径， $P^* = P + P^{\text{ase}}$ 。

8.2 SOA光放大器

模型样式



端口

	端口名称	描述
电学端口	Vinj	注入电流
光学端口	Ipow	功率输入
	Iphase	相位输入
	Ilam	波长输入
	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出
接地	Gnd	接地

参数

参数	单位	值域	典型值
length 有源区长度	m	(0,1e-3]	5e-4
width 有源区宽度	m	(0,50e-6]	3e-6
height 有源区高度	m	(0,5e-6]	8e-8
gamma 光限制因子	1	(0,1]	0.15
alpha_s 内部损耗	m^{-1}	(0,5e4]	4000
dg 差分增益	m^2	(0,50e-20]	2.78e-20
Ntr 载波密度	m^{-3}	(0,5e25]	1.4e24

参数	单位	值域	典型值
alpha 增益系数	1	[-20,20]	5
A 重组系数1	s ⁻¹	[0,1e11]	1.43e8
B 重组系数2	m ³ · s ⁻¹	(0,1e-13]	1e-16
C 重组系数3	m ⁶ · s ⁻¹	(0,1e-37]	3e-41

理论

该模型为SOA光放大器模型，现阶段该模型仅考虑单模单向光传输。SOA中光的复振幅变化如下：

$$E_{\text{out}}(t) = E_{\text{in}}(t) \exp \left[\frac{(1 + j\alpha)\Gamma g(N(t))L - \alpha_s L}{2} \right] \quad (316)$$

式中， Γ 为光限制因子， α 为线宽增强因子（即增益系数）， α_s 为SOA的内部损耗， L 为有源区的长度。 $g(N(t))$ 为材料增益系数，由下式给出：

$$g(N) = \frac{dg}{dN} (N - N_{\text{tr}}) \quad (317)$$

式中， dg/dN 为差分增益， N_{tr} 为透明载流子浓度（即载波密度）。 N 为SOA中的载流子浓度，其通过以下速率方程计算得来：

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I_{\text{in}}}{qV} - R(N) - \frac{\Gamma g(N) P_{\text{av}}(N, t) L}{V h f} \quad (318)$$

式中， V 为有源区体积， $R(N)$ 为包括自发辐射复合、俄歇复合和非辐射跃迁的重组率，表达式如下：

$$R(N) = AN + BN^2 + CN^3 \quad (319)$$

式中 A 、 B 、 C 为重组系数。 P_{av} 为平均光功率，表达式如下：

$$P_{\text{av}} = P_{\text{in}} \frac{\exp[\Gamma g(N(t))L - \alpha_s L] - 1}{\Gamma g(N(t))L - \alpha_s L} \quad (320)$$

9 无源器件

9.1 直波导（模式耦合）

模型样式



端口

	端口名称	描述
光学端口	Ipow	功率输入
	Iphase	相位输入
	Ilam	波长输入
	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出

参数

参数	单位	值域	典型值
modespec 模式类型，1为TE模，2为TM模	不适用	1,2	1
alpha_use_dBm 衰减单位，0为 m^{-1} ，1为dB/m	不适用	0,1	1
reffreq 参考频率	Hz	$(0, \infty)$	1.931e14
length 波导长度	m	$[0, \infty)$	1e-3
neff_te TE模有效折射率		$(0, \infty)$	2.6
neff_tm TM模有效折射率		$(0, \infty)$	2.6
n_gv_te TE模群折射率		$(0, \infty)$	4.2
n_gv_tm TM模群折射率		$(0, \infty)$	4.2
disper_te TE模色散	$s \cdot m^{-2}$		0

参数	单位	值域	典型值
disper_tm TM模色散	$s \cdot m^{-2}$		0
attenu_te TE模衰减（单位受 alpha_use_dBm 控制）	m^{-1} 或dB/m	$[0, \infty)$	0 dB/m
attenu_tm TM模衰减（单位受 alpha_use_dBm 控制）	m^{-1} 或dB/m	$[0, \infty)$	0 dB/m
phasedelay_te TE模相移	$^{\circ}$		0
phasedelay_tm TM模相移	$^{\circ}$		0
coupling_tem TE模和TM模间耦合系数			0

理论

该模型为模式耦合波导，支持TE模或TM模传播，不支持同时传播，现阶段不支持模式耦合。该模型的光输出由下式给出：

$$\begin{bmatrix} E_{out,TE} \\ E_{out,TM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{TE,TE} & T_{TE,TM} \\ T_{TM,TE} & T_{TM,TM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{in,TE} \\ E_{in,TM} \end{bmatrix} \quad (321)$$

上述矩阵中的各项由下述公式给出：

$$T_{TE,TE}(f) = [\cos \theta - jR \sin \theta] \cdot \exp \left\{ -j\tilde{\beta}_{av}L + j\Delta\phi_{TE} \right\} \quad (322)$$

$$T_{TM,TM}(f) = [\cos \theta + jR \sin \theta] \cdot \exp \left\{ -j\tilde{\beta}_{av}L + j\Delta\phi_{TM} \right\} \quad (323)$$

$$T_{TE,TM}(f) = -jS \sin \theta \cdot \exp \left\{ -\frac{j}{2}\tilde{\beta}_{av}L + j\Delta\phi_{TE} \right\} \quad (324)$$

$$T_{TM,TE}(f) = -jS \sin \theta \cdot \exp \left\{ -\frac{j}{2}\tilde{\beta}_{av}L + j\Delta\phi_{TM} \right\} \quad (325)$$

上述公式中，

$$\tilde{\beta}_{av} = \frac{1}{2} [\tilde{\beta}_{TE}(f) + \tilde{\beta}_{TM}(f)] \quad (326)$$

$$\delta\tilde{\beta} = \tilde{\beta}_{TE}(f) - \tilde{\beta}_{TM}(f) \quad (327)$$

$$\Delta T = \sqrt{(\delta\tilde{\beta}/2)^2 + \kappa^2} \quad (328)$$

$$\theta = \Delta T \cdot L \quad (329)$$

$$R = \frac{\delta\tilde{\beta}/2}{\Delta T} \quad (330)$$

$$S = \frac{\kappa}{\Delta T} \quad (331)$$

式中， L 为波导长度， κ 为耦合系数。

传播系数 $\tilde{\beta}(f)$ 由下式定义:

$$\tilde{\beta}(f) = \frac{2\pi f_0}{c} \cdot n_{\text{eff}}(f_0) + \frac{2\pi}{c} \cdot n_{\text{gr}}(f_0) \cdot (f - f_0) - \frac{\pi c \cdot D(f_0)}{f_0^2} \cdot (f - f_0)^2 - \frac{j}{2} \alpha \quad (332)$$

式中, n_{eff} 为有效折射率, n_{gr} 为群折射率, α 为衰减, D 为色散。对于各模式, 将对应折射率及色散代入即可。

9.2 弯曲波导（模式耦合）

模型样式



端口

	端口名称	描述
光学端口	Ipow	功率输入
	Iphase	相位输入
	Ilam	波长输入
	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出

参数

参数	单位	值域	典型值
modespec 模式类型，1为TE模，2为TM模	不适用	1,2	1
alpha_use_dBm 衰减单位，0为 m^{-1} ，1为dB/m	不适用	0,1	1
reffreq 参考频率	Hz	(0,∞)	1.931e14
neff_te_0 TE模基准折射率		(0,∞)	2.6
neff_tm_0 TM模基准折射率		(0,∞)	2.6
n_gv_te TE模群折射率		(0,∞)	4.2
n_gv_tm TM模群折射率		(0,∞)	4.2
disper_te TE模色散	$s \cdot m^{-2}$		0
disper_tm TM模色散	$s \cdot m^{-2}$		0
attenu_te TE模基准衰减（单位受 alpha_use_dBm 控制）	m^{-1} 或dB/m	[0,∞)	0 dB/m

参数	单位	值域	典型值
attenu_tm TM模基准衰减（单位受 alpha_use_dBm 控制）	m^{-1} 或dB/m	$[0, \infty)$	0 dB/m
phasedelay_te TE模相移	$^{\circ}$		0
phasedelay_tm TM模相移	$^{\circ}$		0
coupling_tem TE模和TM模间耦合系数			0
radius 弯曲半径	m	$(0, \infty)$	1e-3
angle 弯曲角度	$^{\circ}$	$(0, \infty)$	90
kn_te TE模折射率变化系数	m^2		0
kn_tm TM模折射率变化系数	m^2		0
A_te TE模衰减系数A（单位受 alpha_use_dBm 控制）	$1/\sqrt{m}$ 或dB/ \sqrt{m}	$[0, \infty)$	0 dB/ \sqrt{m}
A_tm TM模衰减系数A（单位受 alpha_use_dBm 控制）	$1/\sqrt{m}$ 或dB/ \sqrt{m}	$[0, \infty)$	0 dB/ \sqrt{m}
B_te TE模衰减系数B	m^{-1}	$[0, \infty)$	0
B_tm TM模衰减系数B	m^{-1}	$[0, \infty)$	0

理论

该模型为模式耦合弯曲波导，支持TE模或TM模传播，不支持同时传播，现阶段不支持模式耦合。该模型的光输出由下式给出：

$$\begin{bmatrix} E_{out,TE} \\ E_{out,TM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{TE,TE} & T_{TE,TM} \\ T_{TM,TE} & T_{TM,TM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{in,TE} \\ E_{in,TM} \end{bmatrix} \quad (333)$$

上述矩阵中的各项由下述公式给出：

$$T_{TE,TE}(f) = [\cos \theta - jR \sin \theta] \cdot \exp \left\{ -j\tilde{\beta}_{av}L + j\Delta\phi_{TE} \right\} \quad (334)$$

$$T_{TM,TM}(f) = [\cos \theta + jR \sin \theta] \cdot \exp \left\{ -j\tilde{\beta}_{av}L + j\Delta\phi_{TM} \right\} \quad (335)$$

$$T_{TE,TM}(f) = -jS \sin \theta \cdot \exp \left\{ -\frac{j}{2}\tilde{\beta}_{av}L + j\Delta\phi_{TE} \right\} \quad (336)$$

$$T_{TM,TE}(f) = -jS \sin \theta \cdot \exp \left\{ -\frac{j}{2}\tilde{\beta}_{av}L + j\Delta\phi_{TM} \right\} \quad (337)$$

上述公式中,

$$\tilde{\beta}_{\text{av}} = \frac{1}{2} [\tilde{\beta}_{\text{TE}}(f) + \tilde{\beta}_{\text{TM}}(f)] \quad (338)$$

$$\delta\tilde{\beta} = \tilde{\beta}_{\text{TE}}(f) - \tilde{\beta}_{\text{TM}}(f) \quad (339)$$

$$\Delta T = \sqrt{(\delta\tilde{\beta}/2)^2 + \kappa^2} \quad (340)$$

$$\theta = \Delta T \cdot L \quad (341)$$

$$R = \frac{\delta\tilde{\beta}/2}{\Delta T} \quad (342)$$

$$S = \frac{\kappa}{\Delta T} \quad (343)$$

式中, L 为波导长度(由半径 r 和角度求得), κ 为耦合系数。

传播系数 $\tilde{\beta}(f)$ 由下式定义:

$$\tilde{\beta}(f) = \frac{2\pi f_0}{c} \cdot n_{\text{eff}}(f_0) + \frac{2\pi}{c} \cdot n_{\text{gr}}(f_0) \cdot (f - f_0) - \frac{\pi c \cdot D(f_0)}{f_0^2} \cdot (f - f_0)^2 - \frac{j}{2} \alpha \quad (344)$$

式中, n_{eff} 为有效折射率, n_{gr} 为群折射率, α 为衰减, D 为色散。对于各模式, 将对应折射率及色散代入即可。式中的有效折射率和衰减由下式给出:

$$n_{\text{eff}}(f_0) = n_{\text{eff}}^0(f_0) + \frac{k(f_0)}{r^2} \quad (345)$$

$$\alpha = \alpha^0(f_0) + \frac{A(f_0)}{\sqrt{r}} \exp(-B(f_0) \cdot r) \quad (346)$$

式中, A 、 B 为衰减系数, k 为折射率变化系数, r 为波导半径。

9.3 直波导（光学长度）

模型样式



端口

	端口名称	描述
光学端口	Ipow	功率输入
	Iphase	相位输入
	Ilam	波长输入
	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出

参数

参数	单位	值域	典型值
modespec 模式类型，1为TE模，2为TM模		[1,2]	1
optlength_te TE模光学长度	m	[0,∞)	1e-3
optlength_tm TM模光学长度	m	[0,∞)	1e-3
optloss_te TE模光学损耗	dB	[0,∞)	0
optloss_tm TM模光学损耗	dB	[0,∞)	0
phasedelay_te TE模相移	°		0
phasedelay_tm TM模相移	°		0

理论

该模型为由光学长度定义的波导，支持TE模或TM模传播，不支持同时传播及模式耦合。对于一个模式，该模型的光输出由下式给出：

$$E_{\text{out}} = 10^{-\alpha_{\text{opt}}/20} \exp \left[-j \frac{2\pi f}{c} L_{\text{opt}} + j\Delta\phi \right] \cdot E_{\text{in}} \quad (347)$$

式中， α_{opt} 为光学损耗， L_{opt} 为光学长度， $\Delta\phi$ 为相移。

9.4 MMI(1×2)

模型样式



端口

	端口名称	描述
光学端口	Ipow	功率输入
	Iphase	相位输入
	Ilam	波长输入
	Opow1	端口1功率输出
	Ophase1	端口1相位输出
	Olam1	端口1波长输出
	Opow2	端口2功率输出
	Ophase2	端口2相位输出
Olam2	端口2波长输出	

参数

参数	单位	值域	典型值
design_lam 设计波长	m	(0,∞)	1.55e-6
n_ps MMI波导折射率		(0,∞)	3.45
n_sub 衬底折射率		(0,∞)	1.45
width_MMI MMI干涉区长度	m	(0,∞)	3e-6
width_port MMI端口长度	m	(0,∞)	4.5e-7
port_offset 端口位置		(0,∞)	7.5e-7
thickness MMI厚度	m	(0,∞)	2.2e-7
alpha_mmi MMI光衰减	m^{-1}	(0,∞)	80

理论

该模型基于文献^[1]搭建。该模型目前只考虑TE或TM一种模式输入，不考虑偏振相关效应。假定该MMI模型各端口结构相同且对称，该MMI模型可由下述传输矩阵描述：

$$\begin{bmatrix} E_{out1} \\ E_{out2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{1,1} \\ T_{2,1} \end{bmatrix} E_{in} \quad (348)$$

式中的传输矩阵元如下所示：

$$T_{q,1} = \sum_{\nu=0}^{m-1} C_{in,1}^{\nu} C_{out,q}^{\nu} \exp(-j\beta L) \exp(-\alpha L) \quad (349)$$

式中为MMI的总模式数量，q代表输出端口的编号， β 为传播常数， α 为光衰减， L 为MMI器件的光学等效长度。耦合系数 C_{in} 和 C_{out} 由下述公式表达：

$$C_{in,1}^{\nu} = \frac{\int \Psi_1(y, 0) \psi_{\nu}(y) dy}{\sqrt{\int \psi_{\nu}(y) dy}} \quad (350)$$

$$C_{out,q}^{\nu} = \frac{\int \psi_{\nu}(y) \Psi_q(y, L) dy}{\sqrt{\int \psi_{\nu}(y) dy}} \quad (351)$$

上述公式中， $\Psi_1(y, 0)$ 代表输入端口的模式函数， $\psi_{\nu}(y)$ 代表MMI中的各模式的模式函数， $\Psi_q(y, L)$ 代表各输出端口的模式函数。上述各模式、传播常数与模式数量的计算涉及大量模式求解内容，这里不再赘述。

示例

使用的原理图如图59所示。使用普通光源产生光信号并传递进MMI，使用两组电阻来代替理想探测器，测量Opow1或Opow2端口的光功率信号即可获得MMI的工作情况。使用该原理图测量MMI输出光功率随波长的变化，可得到图60中的结果。

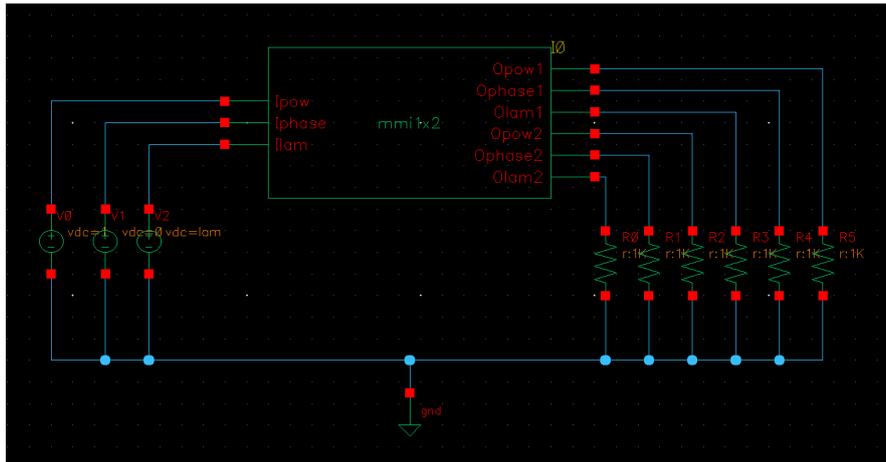


图 59: MMI仿真原理图

对比

我们使用文献^[1]中的数据，对MMI输出光功率随波长的变化进行了对比，结果如图61所示。

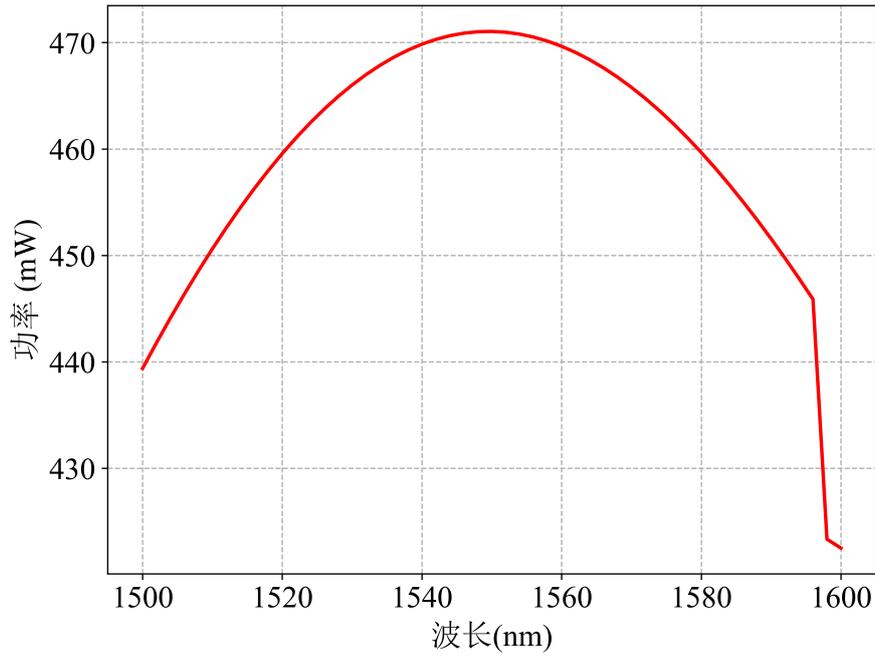


图 60: MMI输出光功率随波长的变化

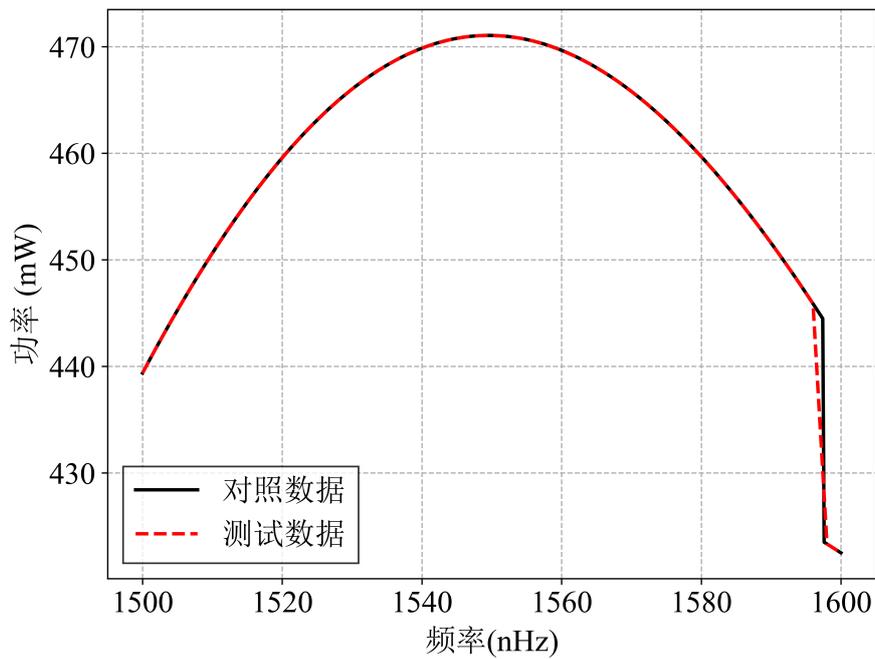


图 61: MMI输出光功率随波长的变化结果对比

参考文献

- [1] CHEN X, WANG Z, CHANG Y S, et al. Modeling and Analysis of Optical Modulators Based on Free-Carrier Plasma Dispersion Effect[J/OL]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2020, 39(5): 977-990[2024-01-08]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8675505/>. DOI: 10.1109/TCAD.2019.2907907.

9.5 MMI(2×2)

模型样式



端口

	端口名称	描述
光学端口	Ipow1	端口1功率输入
	Iphase1	端口1相位输入
	Ilam1	端口1波长输入
	Ipow2	端口2功率输入
	Iphase2	端口2相位输入
	Ilam2	端口2波长输入
	Opow1	端口1功率输出
	Ophase1	端口1相位输出
	Olam1	端口1波长输出
	Opow2	端口2功率输出
	Ophase2	端口2相位输出
	Olam2	端口2波长输出

参数

参数	单位	值域	典型值
design_lam 设计波长	m	(0,∞)	1.55e-6
n_ps MMI波导折射率		(0,∞)	3.45
n_sub 衬底折射率		(0,∞)	1.45
width_MMI MMI干涉区长度	m	(0,∞)	3e-6
width_port MMI端口长度	m	(0,∞)	4.5e-7
port_offset 端口位置		(0,∞)	7.5e-7

参数	单位	值域	典型值
thickness MMI厚度	m	(0,∞)	2.2e-7
alpha_mmi MMI光衰减	m ⁻¹	(0,∞)	80

理论

2×2的MMI与1×2的MMI的计算原理相同^[1]。该模型由下述传输矩阵描述：

$$\begin{bmatrix} E_{out1} \\ E_{out2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{1,1} & T_{1,2} \\ T_{2,1} & T_{2,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{in1} \\ E_{in2} \end{bmatrix} \quad (352)$$

式中的传输矩阵元如下所示：

$$T_{q,p} = \sum_{\nu=0}^{m-1} C_{in,p}^{\nu} C_{out,q}^{\nu} \exp(-j\beta L) \exp(-\alpha L) \quad (353)$$

式中为MMI的总模式数量，p代表输入端口的编号，q代表输出端口的编号， β 为传播常数， α 为光衰减， L 为MMI器件的光学等效长度。耦合系数 C_{in} 和 C_{out} 由下述公式表达：

$$C_{in,1}^{\nu} = \frac{\int \Psi_p(y, 0) \psi_{\nu}(y) dy}{\sqrt{\int \psi_{\nu}(y) dy}} \quad (354)$$

$$C_{out,q}^{\nu} = \frac{\int \psi_{\nu}(y) \Psi_q(y, L) dy}{\sqrt{\int \psi_{\nu}(y) dy}} \quad (355)$$

上述公式中， $\Psi_p(y, 0)$ 代表各输入端口的模式函数， $\psi_{\nu}(y)$ 代表MMI中的各模式的模式函数， $\Psi_q(y, L)$ 代表各输出端口的模式函数。上述各模式、传播常数与模式数量的计算涉及大量模式求解内容，这里不再赘述。

参考文献

- [1] CHEN X, WANG Z, CHANG Y S, et al. Modeling and Analysis of Optical Modulators Based on Free-Carrier Plasma Dispersion Effect[J/OL]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2020, 39(5): 977-990[2024-01-08]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8675505/>. DOI: 10.1109/TCAD.2019.2907907.

9.6 简单增益

模型样式



端口

	端口名称	描述
光学端口	Ipow	功率输入
	Iphase	相位输入
	Ilam	波长输入
	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出

参数

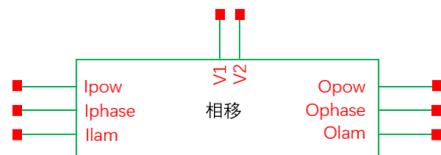
参数	单位	值域	典型值
G 增益系数		$[0, \infty)$	1

理论

该模型为理想光增益器件，其作用为将光功率变为输入的G倍，不改变光信号的相位。由于G可以小于一，该模型也可以用于理想的衰减情况。更为物理化的增益模型请参见光放大器章节。

9.7 简单相移

模型样式



端口

	端口名称	描述
电学端口	V1	相位控制端口1
	V2	相位控制端口2
光学端口	Ipow	功率输入
	Iphase	相位输入
	Ilam	波长输入
	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出

参数

参数	单位	值域	典型值
a 相位变化增幅			1
phi 初始相位		(-360,360)	0

理论

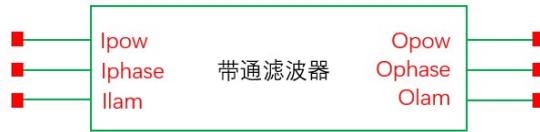
该模型为理想相移器件。该模型的相位变化如下式所示：

$$\phi_{\text{out}} = a\phi_{\text{in}} + \phi_{\text{ori}} \quad (356)$$

式中， a 为相位变化增幅， ϕ_{ori} 为初始相位。

9.8 标准滤波器

模型样式



端口

	端口名称	描述
光学端口	Ipow	功率输入
	Iphase	相位输入
	Ilam	波长输入
	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出

参数

参数	单位	值域	典型值
centerfreq 中心频率	Hz		1e9
bandwidth 带宽	Hz	$[0, \infty)$	0
loss 损耗比		$[0, 1]$	0

理论

该模型为理想带通滤波器。该模型仅允许频率在带宽内的光信号通过。该模型支持设置损耗，可使输出光信号依照设置的比例衰减。

示例

使用的原理图如图62所示。使用普通光源产生光信号并传递进滤波器，使用两组电阻来代替理想探测器，测量Opow端口的光功率信号即可获得滤波器的工作情况。使用该原理图测量滤波器输出光功率随频率的变化，可得到图63中的结果。

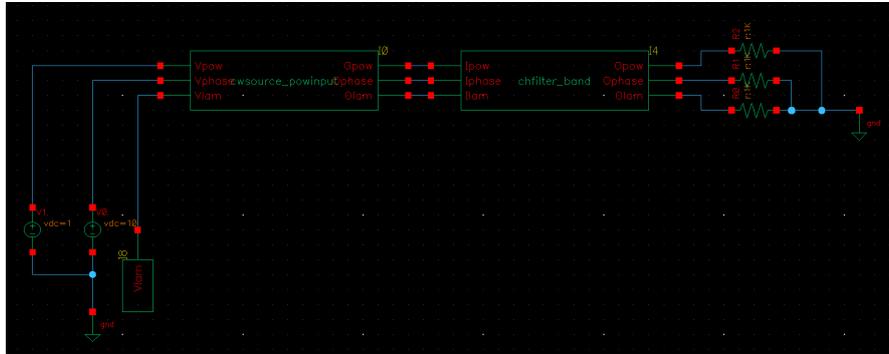


图 62: 标准滤波器仿真原理图

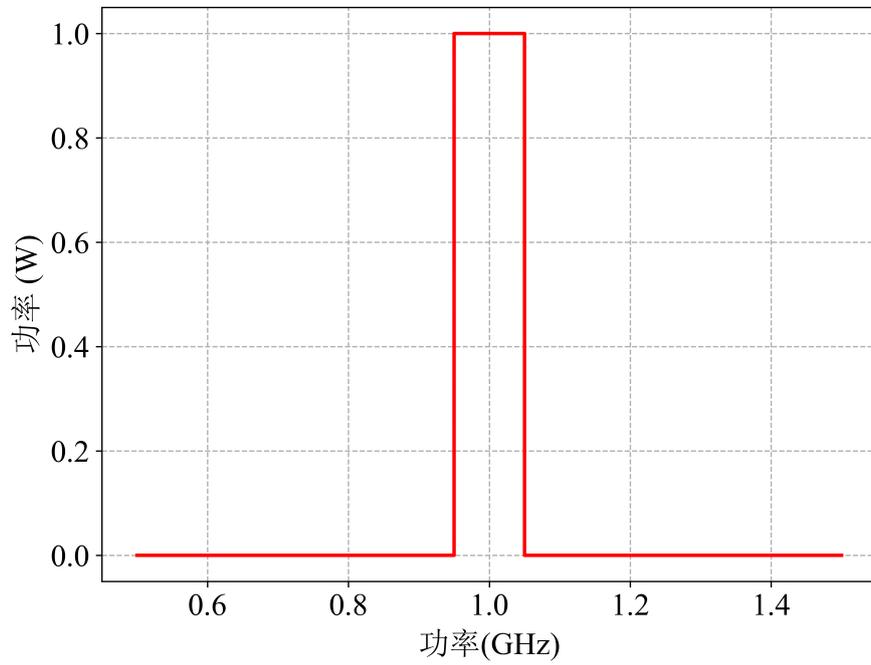
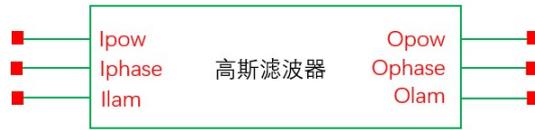


图 63: 标准滤波器输出光功率随波长的变化

9.9 高斯滤波器

模型样式



端口

	端口名称	描述
光学端口	Ipow	功率输入
	Iphase	相位输入
	Ilam	波长输入
	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出

参数

参数	单位	值域	典型值
centerfreq 中心频率	Hz		1e9
sigma 高斯分布 σ 常数		(0,∞)	1
resize 重整标记		0,1	0

理论

该模型为理想高斯滤波器。输出的光功率如下：

$$E_{\text{out}}(f) = E_{\text{in}} \cdot \exp\left(-\frac{(f - f_{\text{center}})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (357)$$

若考虑重整化（即积分为1），则输出光功率如下：

$$E_{\text{out}}(f) = E_{\text{in}} \cdot \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(f - f_{\text{center}})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (358)$$

示例

使用的原理图如图64所示。使用普通光源产生光信号并传递进滤波器，使用两组电阻来代替理想探测器，测量Opow端口的光功率信号即可获得滤波器的工作情况。使用该原理图测量滤波器输出光功率随频率的变化，可得到图65中的结果。

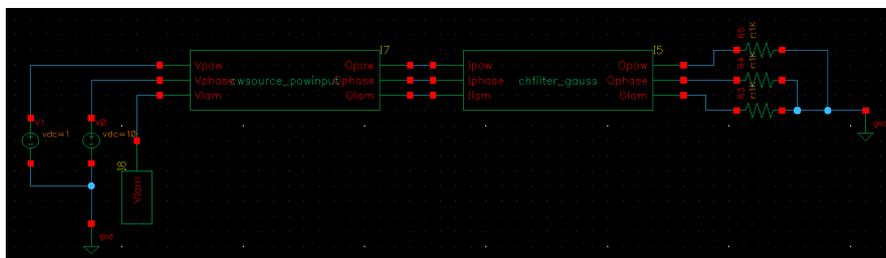


图 64: 高斯滤波器仿真原理图

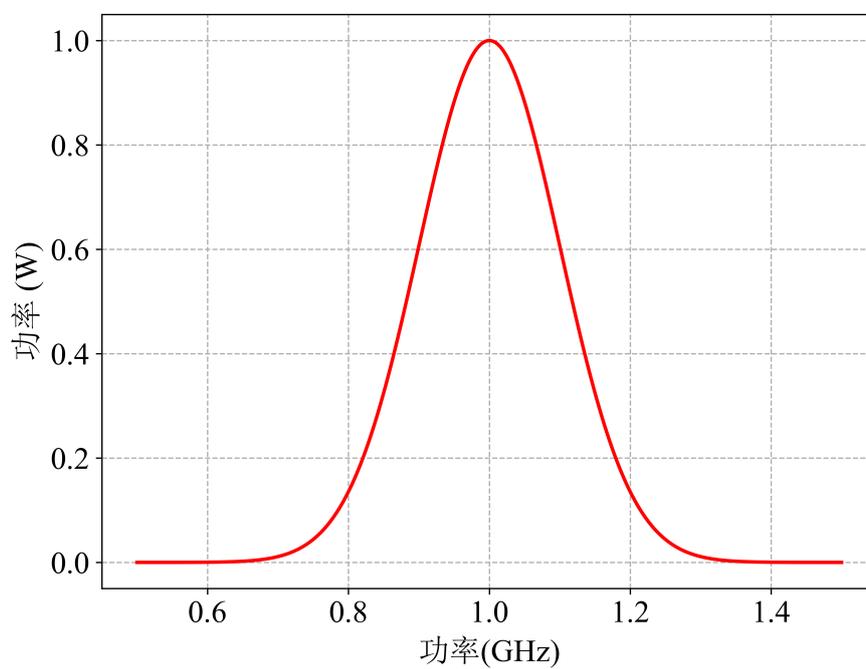
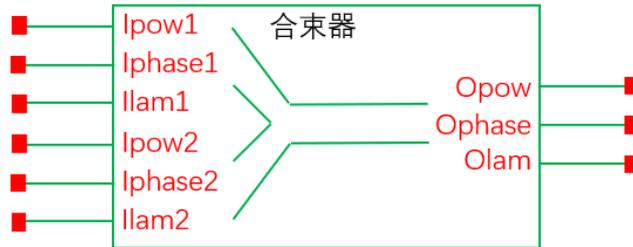


图 65: 高斯滤波器输出光功率随波长的变化

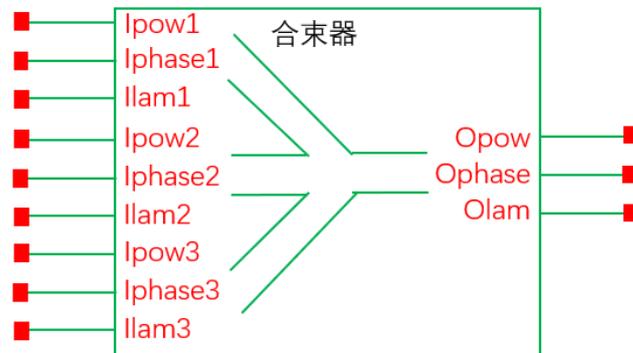
9.10 理想合束器

模型样式

理想二输入合束器：



理想三输入合束器：



端口

理想二输入合束器：

	端口名称	描述
光学端口	Ipow1	端口1功率输入
	Iphase1	端口1相位输入
	Ilam1	端口1波长输入
	Ipow2	端口2功率输入
	Iphase2	端口2相位输入
	Ilam2	端口2波长输入
	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出

理想三输入合束器:

	端口名称	描述
光学端口	Ipow1	端口1功率输入
	Iphase1	端口1相位输入
	Ilam1	端口1波长输入
	Ipow2	端口2功率输入
	Iphase2	端口2相位输入
	Ilam2	端口2波长输入
	Ipow3	端口3功率输入
	Iphase3	端口3相位输入
	Ilam3	端口3波长输入
	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出

参数

理想二输入合束器:

参数	单位	值域	典型值
n1 端口1输入占比		[0,1]	0.5
n2 端口2输入占比		[0,1]	0.5

理想三输入合束器:

参数	单位	值域	典型值
n1 端口1输入占比		[0,1]	0.3333
n2 端口2输入占比		[0,1]	0.3333
n3 端口3输入占比		[0,1]	0.3333

理论

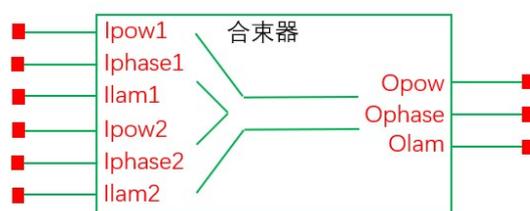
该模型为理想合束器，其输出如下所示：

$$P_{\text{out}} = \left(\sqrt{\frac{P_{\text{in1}}}{n_1}} + \sqrt{\frac{P_{\text{in2}}}{n_2}} + \sqrt{\frac{P_{\text{in3}}}{n_3}} + \dots \right) \quad (359)$$

式中， n_1 等数据均由器件设置给出，方程数量根据输入端口数量决定。该模型可扩展为具有多个输入端口的模型。

9.11 基本二输入合束器

模型样式



端口

	端口名称	描述
光学端口	Ipow1	端口1功率输入
	Iphase1	端口1相位输入
	Ilam1	端口1波长输入
	Ipow2	端口2功率输入
	Iphase2	端口2相位输入
	Ilam2	端口2波长输入
	Opow	功率输出
	Ophase	相位输出
	Olam	波长输出

参数

参数	单位	值域	典型值
modespec 模式类型，1为TE模，2为TM模	不适用	1,2	1
alpha_use_dBm 衰减单位，0为 m^{-1} ，1为dB/m	不适用	0,1	1
reffreq 参考频率	Hz	(0, ∞)	1.931e14
l_str 直波导长度	m	[0, ∞)	5e-4
l_up 上臂长度	m	[0, ∞)	5e-4
l_down 下臂长度	m	[0, ∞)	5e-4
neff_te TE模有效折射率		(0, ∞)	2.6
neff_tm TM模有效折射率		(0, ∞)	2.6

参数	单位	值域	典型值
n_gv_te TE模群折射率		(0,∞)	4.2
n_gv_tm TM模群折射率		(0,∞)	4.2
disper_te TE模色散	s · m ⁻²		0
disper_tm TM模色散	s · m ⁻²		0
attenu_te TE模衰减（单位受alpha_use_dBm控制）	m ⁻¹ 或dB/m	[0,∞)	0 dB/m
attenu_tm TM模衰减（单位受alpha_use_dBm控制）	m ⁻¹ 或dB/m	[0,∞)	0 dB/m
design_freq 设计频率	Hz	(0,∞)	1.931e14
s0_te TE模分束比		[0,1]	0.5
s0_tm TM模分束比		[0,1]	0.5
dfreq_te TE模斜率带宽	Hz	[0,∞)	1e14
dfreq_tm TM模斜率带宽	Hz	[0,∞)	1e14
ds_te TE模斜率系数	Hz		0
ds_tm TM模斜率系数	Hz		0
scat_loss_te TE模散射损失	dB	[0,∞)	0
scat_loss_tm TM模散射损失	dB	[0,∞)	0

理论

该模型为基本二端口合束器，支持TE模或TM模传播，不支持同时传播及模式耦合。对于一种模式，光信号的变化由下述矩阵控制：

$$E_{\text{out}} = \begin{bmatrix} T_1 & T_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\text{in1}} \\ E_{\text{in2}} \end{bmatrix} \quad (360)$$

式中， T_1 和 T_2 由下式给出：

$$T_1(f) = 10^{-\frac{\gamma}{20}} \sqrt{S(f)} \exp \left[-j\tilde{\beta}(f) (L_{\text{str}} + L_{\text{up}}) \right] \quad (361)$$

$$T_2(f) = 10^{-\frac{\gamma}{20}} \sqrt{1 - S(f)} \exp \left[-j\tilde{\beta}(f) (L_{\text{str}} + L_{\text{low}}) \right] \quad (362)$$

上述公式中， γ 为散射损耗， L_{str} 为直波导段的长度， L_{up} 为输入端口1对应的波导长度， L_{low} 为输入端口2对应的波导长度。 $S(f)$ 为实际分束比，由设置的分束比计算得来：

$$S(f) = \begin{cases} S_0 - \frac{\Delta f}{2} \Delta S, & \left(f \leq f_0 - \frac{\Delta f}{2} \right) \\ S_0 + (f - f_0) \Delta S, & \left(f_0 - \frac{\Delta f}{2} \leq f \leq f_0 + \frac{\Delta f}{2} \right) \\ S_0 + \frac{\Delta f}{2} \Delta S, & \left(f \geq f_0 + \frac{\Delta f}{2} \right) \end{cases} \quad (363)$$

式中， f_0 为设计频率， ΔS 为斜率系数， Δf 为斜率带宽。

传播系数 $\tilde{\beta}(f)$ 由下式定义：

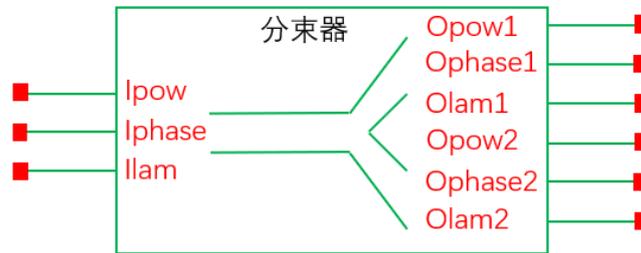
$$\tilde{\beta}(f) = \frac{2\pi f_0}{c} \cdot n_{\text{eff}}(f_0) + \frac{2\pi}{c} \cdot n_{\text{gr}}(f_0) \cdot (f - f_0) - \frac{\pi c \cdot D(f_0)}{f_0^2} \cdot (f - f_0)^2 - \frac{j}{2} \alpha \quad (364)$$

式中， n_{eff} 为有效折射率， n_{gr} 为群折射率， α 为衰减， D 为色散。

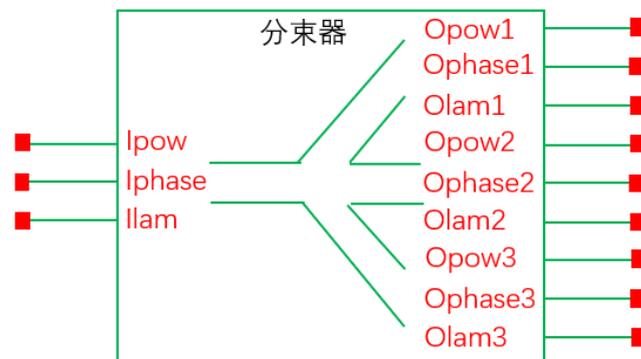
9.12 理想分束器

模型样式

理想二输出分束器：



理想三输出分束器：



端口

理想二输出分束器：

	端口名称	描述
光学端口	Ipow	功率输入
	Iphase	相位输入
	Ilam	波长输入
	Opow1	端口1功率输出
	Ophase1	端口1相位输出
	Olam1	端口1波长输出
	Opow2	端口2功率输出
	Ophase2	端口2相位输出
	Olam2	端口2波长输出

理想三输出分束器:

	端口名称	描述
光学端口	Ipow	功率输入
	Iphase	相位输入
	Ilam	波长输入
	Opow1	端口1功率输出
	Ophase1	端口1相位输出
	Olam1	端口1波长输出
	Opow2	端口2功率输出
	Ophase2	端口2相位输出
	Olam2	端口2波长输出
	Opow3	端口3功率输出
	Ophase3	端口3相位输出
	Olam3	端口3波长输出

参数

理想二输出分束器:

参数	单位	值域	典型值
r1 端口1输出占比		[0,1]	0.5
r2 端口2输出占比		[0,1]	0.5

理想三输出分束器:

参数	单位	值域	典型值
r1 端口1输出占比		[0,1]	0.3333
r2 端口2输出占比		[0,1]	0.3333
r3 端口3输出占比		[0,1]	0.3333

理论

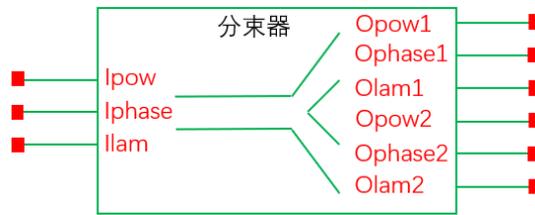
该模型为理想分束器，其各端口输出如下所示：

$$\begin{aligned}P_{\text{out}1} &= r_1 \cdot P_{\text{in}} \\P_{\text{out}2} &= r_2 \cdot P_{\text{in}} \\P_{\text{out}3} &= r_3 \cdot P_{\text{in}} \\&\dots\end{aligned}\tag{365}$$

式中， r_1 等数据均由器件设置给出，方程数量根据输出端口数量决定。该模型可扩展为具有多个输出端口的模型。

9.13 基本二输出分束器

模型样式



端口

	端口名称	描述
光学端口	Ipow	功率输入
	Iphase	相位输入
	Ilam	波长输入
	Opow1	端口1功率输出
	Ophase1	端口1相位输出
	Olam1	端口1波长输出
	Opow2	端口2功率输出
	Ophase2	端口2相位输出
	Olam2	端口2波长输出

参数

参数	单位	值域	典型值
modespec 模式类型, 1为TE模, 2为TM模	不适用	1,2	1
alpha_use_dBm 衰减单位, 0为 m^{-1} , 1为dB/m	不适用	0,1	1
reffreq 参考频率	Hz	(0, ∞)	1.931e14
l_str 直波导长度	m	[0, ∞)	5e-4
l_up 上臂长度	m	[0, ∞)	5e-4
l_down 下臂长度	m	[0, ∞)	5e-4
neff_te TE模有效折射率		(0, ∞)	2.6
neff_tm TM模有效折射率		(0, ∞)	2.6

参数	单位	值域	典型值
n_gv_te TE模群折射率		(0,∞)	4.2
n_gv_tm TM模群折射率		(0,∞)	4.2
disper_te TE模色散	s · m ⁻²		0
disper_tm TM模色散	s · m ⁻²		0
attenu_te TE模衰减（单位受alpha_use_dBm控制）	m ⁻¹ 或dB/m	[0,∞)	0 dB/m
attenu_tm TM模衰减（单位受alpha_use_dBm控制）	m ⁻¹ 或dB/m	[0,∞)	0 dB/m
design_freq 设计频率	Hz	(0,∞)	1.931e14
s0_te TE模分束比		[0,1]	0.5
s0_tm TM模分束比		[0,1]	0.5
dfreq_te TE模斜率带宽	Hz	[0,∞)	1e14
dfreq_tm TM模斜率带宽	Hz	[0,∞)	1e14
ds_te TE模斜率系数	Hz		0
ds_tm TM模斜率系数	Hz		0
scat_loss_te TE模散射损失	dB	[0,∞)	0
scat_loss_tm TM模散射损失	dB	[0,∞)	0

理论

该模型为基本二端口分束器，支持TE模或TM模传播，不支持同时传播及模式耦合。对于一种模式，光信号的变化由下述矩阵控制：

$$\begin{bmatrix} E_{out1} \\ E_{out2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} E_{in} \quad (366)$$

式中， T_1 和 T_2 由下式给出：

$$T_1(f) = 10^{-\frac{\gamma}{20}} \sqrt{S(f)} \exp \left[-j\tilde{\beta}(f) (L_{str} + L_{up}) \right] \quad (367)$$

$$T_2(f) = 10^{-\frac{\gamma}{20}} \sqrt{1 - S(f)} \exp \left[-j\tilde{\beta}(f) (L_{\text{str}} + L_{\text{low}}) \right] \quad (368)$$

上述公式中， γ 为散射损耗， L_{str} 为直波导段的长度， L_{up} 为输入端口1对应的波导长度， L_{low} 为输入端口2对应的波导长度。 $S(f)$ 为实际分束比，由设置的分束比计算得来：

$$S(f) = \begin{cases} S_0 - \frac{\Delta f}{2} \Delta S, & \left(f \leq f_0 - \frac{\Delta f}{2} \right) \\ S_0 + (f - f_0) \Delta S, & \left(f_0 - \frac{\Delta f}{2} \leq f \leq f_0 + \frac{\Delta f}{2} \right) \\ S_0 + \frac{\Delta f}{2} \Delta S, & \left(f \geq f_0 + \frac{\Delta f}{2} \right) \end{cases} \quad (369)$$

式中， f_0 为设计频率， ΔS 为斜率系数， Δf 为斜率带宽。

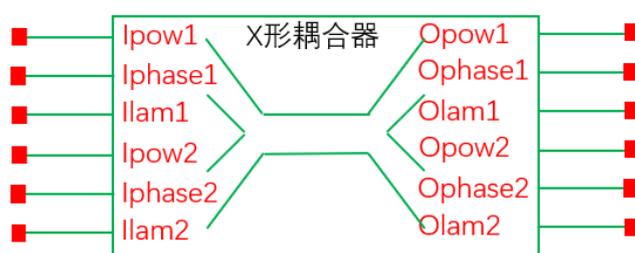
传播系数 $\tilde{\beta}(f)$ 由下式定义：

$$\tilde{\beta}(f) = \frac{2\pi f_0}{c} \cdot n_{\text{eff}}(f_0) + \frac{2\pi}{c} \cdot n_{\text{gr}}(f_0) \cdot (f - f_0) - \frac{\pi c \cdot D(f_0)}{f_0^2} \cdot (f - f_0)^2 - \frac{j}{2} \alpha \quad (370)$$

式中， n_{eff} 为有效折射率， n_{gr} 为群折射率， α 为衰减， D 为色散。

9.14 理想X形耦合器

模型样式



端口

	端口名称	描述
光学端口	Ipow1	端口1功率输入
	Iphase1	端口1相位输入
	Ilam1	端口1波长输入
	Ipow2	端口2功率输入
	Iphase2	端口2相位输入
	Ilam2	端口2波长输入
	Opow1	端口1功率输出
	Ophase1	端口1相位输出
	Olam1	端口1波长输出
	Opow2	端口2功率输出
	Ophase2	端口2相位输出
	Olam2	端口2波长输出

参数

参数	单位	值域	典型值
modespec 模式类型，1为TE模，2为TM模	不适用	1,2	1
kappa_te TE模耦合系数		[0,1]	0.5
kappa_tm TM模耦合系数		[0,1]	0.5
p 反转系数		-1,1	1

理论

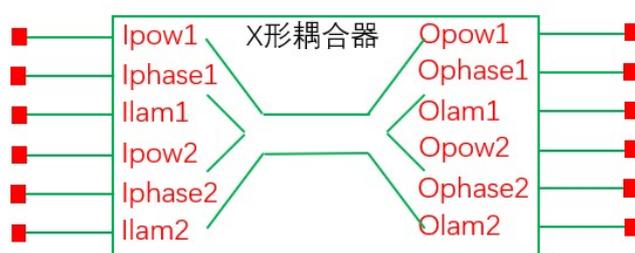
该模型为理想X形耦合器，支持TE模或TM模传播，不支持同时传播及模式耦合。对于一种模式，光信号的变化由下述矩阵控制：

$$\begin{bmatrix} E_{\text{out1}} \\ E_{\text{out2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{1-\kappa} & jp\sqrt{\kappa} \\ jp\sqrt{\kappa} & \sqrt{1-\kappa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\text{in1}} \\ E_{\text{in2}} \end{bmatrix} \quad (371)$$

式中 κ 为耦合系数， p 为反转系数。

9.15 基本X形耦合器

模型样式



端口

	端口名称	描述
光学端口	Ipow1	端口1功率输入
	Iphase1	端口1相位输入
	Ilam1	端口1波长输入
	Ipow2	端口2功率输入
	Iphase2	端口2相位输入
	Ilam2	端口2波长输入
	Opow1	端口1功率输出
	Ophase1	端口1相位输出
	Olam1	端口1波长输出
	Opow2	端口2功率输出
	Ophase2	端口2相位输出
	Olam2	端口2波长输出

参数

参数	单位	值域	典型值
modespec 模式类型, 1为TE模, 2为TM模	不适用	1,2	1
alpha_use_dBm 衰减单位, 0为 m^{-1} , 1为dB/m	不适用	0,1	1
reffreq 参考频率	Hz	$(0, \infty)$	1.931e14
l_upper 上臂波导长度	m	$[0, \infty)$	1e-3
l_lower 下臂波导长度	m	$[0, \infty)$	1e-3
l_coupler 耦合部分长度	m	$[0, \infty)$	3.927e-4

参数	单位	值域	典型值
neff_upper_te 上臂TE模有效折射率		(0,∞)	2.6
neff_upper_tm 上臂TM模有效折射率		(0,∞)	2.6
neff_lower_te 下臂TE模有效折射率		(0,∞)	2.6
neff_lower_tm 下臂TM模有效折射率		(0,∞)	2.6
n_gv_upper_te 上臂TE模群折射率		(0,∞)	4.2
n_gv_upper_tm 上臂TM模群折射率		(0,∞)	4.2
n_gv_lower_te 下臂TE模群折射率		(0,∞)	4.2
n_gv_lower_tm 下臂TM模群折射率		(0,∞)	4.2
disper_upper_te 上臂TE模色散	$s \cdot m^{-2}$	(-∞,∞)	0
disper_upper_tm 上臂TM模色散	$s \cdot m^{-2}$	(-∞,∞)	0
disper_lower_te 下臂TE模色散	$s \cdot m^{-2}$	(-∞,∞)	0
disper_lower_tm 下臂TM模色散	$s \cdot m^{-2}$	(-∞,∞)	0
attenu_upper_te 上臂TE模衰减 (单位受alpha_use_dBm控制)	m^{-1} 或dB/m	[0,∞)	0 dB/m
attenu_upper_tm 上臂TM模衰减 (单位受alpha_use_dBm控制)	m^{-1} 或dB/m	[0,∞)	0 dB/m
attenu_lower_te 下臂TE模衰减 (单位受alpha_use_dBm控制)	m^{-1} 或dB/m	[0,∞)	0 dB/m
attenu_lower_tm 下臂TM模衰减 (单位受alpha_use_dBm控制)	m^{-1} 或dB/m	[0,∞)	0 dB/m
coupling_te TE模耦合系数		(-∞,∞)	2000
coupling_tm TM模耦合系数		(-∞,∞)	2000

理论

该模型为理想X形耦合器，支持TE模或TM模传播，不支持同时传播及模式耦合。对于一种模式，光信号的变化由下述矩阵控制：

$$\begin{bmatrix} E_{\text{out1}} \\ E_{\text{out2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{1,1} & T_{1,2} \\ T_{2,1} & T_{2,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\text{in1}} \\ E_{\text{in2}} \end{bmatrix} \quad (372)$$

上述矩阵中的各项由下述公式给出：

$$T_{1,1}(f) = [\cos \theta - jR \sin \theta] \cdot \exp \left\{ -j\tilde{\beta}_{\text{av}}L_c - j\tilde{\beta}_{\text{up}}(L_{\text{up}} - L_c) \right\} \quad (373)$$

$$T_{2,2}(f) = [\cos \theta + jR \sin \theta] \cdot \exp \left\{ -j\tilde{\beta}_{\text{av}}L_c - j\tilde{\beta}_{\text{low}}(L_{\text{low}} - L_c) \right\} \quad (374)$$

$$T_{1,2}(f) = T_{2,1}(f) = -jS \sin \theta \cdot \exp \left\{ -\frac{j}{2}\tilde{\beta}_{\text{up}}L_{\text{up}} - \frac{j}{2}\tilde{\beta}_{\text{low}}L_{\text{low}} \right\} \quad (375)$$

上述公式中，

$$\tilde{\beta}_{\text{av}} = \frac{1}{2} [\tilde{\beta}_{\text{up}}(f) + \tilde{\beta}_{\text{low}}(f)] \quad (376)$$

$$\delta\tilde{\beta} = \tilde{\beta}_{\text{up}}(f) - \tilde{\beta}_{\text{low}}(f) \quad (377)$$

$$\Delta T = \sqrt{\left(\delta\tilde{\beta}/2\right)^2 + \kappa^2} \quad (378)$$

$$\theta = \Delta T \cdot L_c \quad (379)$$

$$R = \frac{\delta\tilde{\beta}/2}{\Delta T} \quad (380)$$

$$S = \frac{\kappa}{\Delta T} \quad (381)$$

式中， L_c 为耦合波导段的长度， L_{up} 为输入端口1对应的波导长度， L_{low} 为输入端口2对应的波导长度， κ 为耦合系数。

传播系数 $\tilde{\beta}(f)$ 由下式定义：

$$\tilde{\beta}(f) = \frac{2\pi f_0}{c} \cdot n_{\text{eff}}(f_0) + \frac{2\pi}{c} \cdot n_{\text{gr}}(f_0) \cdot (f - f_0) - \frac{\pi c \cdot D(f_0)}{f_0^2} \cdot (f - f_0)^2 - \frac{j}{2}\alpha \quad (382)$$

式中， n_{eff} 为有效折射率， n_{gr} 为群折射率， α 为衰减， D 为色散。对于 $\tilde{\beta}_{\text{up}}(f)$ 和 $\tilde{\beta}_{\text{low}}(f)$ ，将对应折射率及色散代入即可。

10 工具

10.1 随机数生成器

模型样式



端口

	端口名称	描述
电学端口	Vout	随机码电信号输出

参数

参数	单位	值域	典型值
seed 随机数种子			216529
trise 上升沿时间	s	$[0, \infty)$	0
tfall 下降沿时间	s	$[0, \infty)$	0
tdelay 初始延迟	s	$[0, \infty)$	0
tpulse 脉冲宽度	s	$(0, \infty)$	1
vlow 低电平电压	V	$(-\infty, \infty)$	0
vhigh 高电平电压	V	$(-\infty, \infty)$	1

理论

该模型为随机数生成器，用于生成随机数电压序列。若需要随机光信号序列，请将该器件的输出作为基本光源的功率输入。

10.2 PAM4随机数生成器

模型样式



端口

	端口名称	描述
电学端口	Vout	随机码电信号输出

参数

参数	单位	值域	典型值
seed1 随机数种子1			418674
seed2 随机数种子2			416352
seed3 随机数种子3			241412
trise 上升沿时间	s	$[0, \infty)$	0
tfall 下降沿时间	s	$[0, \infty)$	0
tdelay 初始延迟	s	$[0, \infty)$	0
tpulse 脉冲宽度	s	$(0, \infty)$	1
vlow 低电平电压	V	$(-\infty, \infty)$	0
vhigh 高电平电压	V	$(-\infty, \infty)$	1

理论

该模型为PAM4随机数生成器，用于生成PAM4随机数电压序列。若需要随机PAM4光信号序列，请将该器件的输出作为基本光源的功率输入。

注意：该器件的三个随机数参数必须各不相同，否则可能会只有一个到两个高电平。

10.3 频率输入调试器

模型样式



端口

	端口名称	描述
电学端口	Vlam	波长输出

参数

参数	单位	值域	典型值
freq 频率	Hz	(0,∞)	1e9

理论

该模型为使用频率生成对应的波长，将其与基本光源的波长输入端口相连即可得到对应频率的光信号，便于使用频率控制光路。

10.4 光信号复数输出

模型样式



端口

	端口名称	描述
电学端口	Vreal	实部输出
	Vimag	虚部输出
光学端口	Ipow	功率输入
	Iphase	相位输入

理论

该模型用于将功率和相位转化为实部和虚部并以电信号的形式输出，便于查看仿真结果。