



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

EMANUELA PARANHOS LIMA

Dissertação de Mestrado

**ANÁLISE E PROJETO DE ACOPLADORES DE
GUIA DE ONDA PLASMÔNICO**

Salvador
2018

EMANUELA PARANHOS LIMA

**ANÁLISE E PROJETO DE ACOPLADORES DE
GUIA DE ONDA PLASMÔNICO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Vitaly Félix Rodríguez Esquerre.

Salvador
2018

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Paranhos Lima, Emanuela
Análise e Projeto de Acopladores de Guia de Onda
Plasmônico / Emanuela Paranhos Lima. -- Salvador, 2018.
74 f. : il

Orientador: Vitaly Félix Rodríguez Esquerre.
Dissertação (Mestrado - Engenharia Elétrica) --
Universidade Federal da Bahia, Universidade Federal
da Bahia, 2018.

1. Acopladores. 2. Guias de onda. 3. Óptica. 4.
Plasmônica. 5. Plasmon Polariton de Superfície. I.
Félix Rodríguez Esquerre, Vitaly. II. Título.


EMANUELA PARANHOS LIMA

ANÁLISE E PROJETO DE ACOPLADORES DE GUIA
DE ONDA PLASMÔNICO

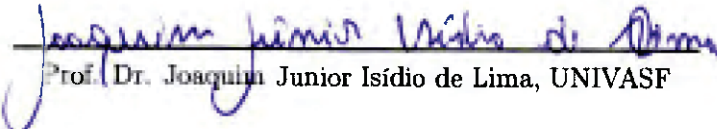
Dissertação de Mestrado aprovada em 17 de Agosto de 2018 pela banca examinadora
composta pelos seguintes membros:



Prof. Dr. Vitaly Félix Rodríguez Esquerre, UFBA
Orientador



Prof. Dr. Karcus Day Rosario Assis, UFBA



Prof. Dr. Joaquim Junior Isídio de Lima, UNIVASF

Dedico esta dissertação à minha mãe, Dona Lina.

Nu saí do ventre de minha mãe,
e nu tornarei para lá.
O Senhor deu, e o Senhor tirou;
bendito seja o nome do Senhor!

Jó 1:21

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por todas as realizações em minha vida.

Agradeço também a minha família por ser minha base sólida e pelo apoio diário.

Agradeço aos meus mestres José Mario Araújo e Eduardo Telmo pelo apoio fundamental no início do mestrado, a todos os professores do PPGEE da UFBA com os quais tive a oportunidade de aprender um pouco mais e aos colegas conquistados durante essa caminhada que de alguma forma contribuíram para a execução deste projeto.

Agradeço ao professor Cosme Mercedes pela enorme disponibilidade em me ajudar com as simulações e aos meus colegas de Labtel.

E por fim, ao professor Vitaly Esquerre pela grande oportunidade dada, pelo incentivo a pesquisa e pelo processo de formação acadêmica.

Resumo

Neste trabalho, acopladores direcionais híbridos, compostos por guias de ondas dielétricos e metálicos, foram analisados em detalhes por simulações computacionais utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF). A resposta dos guias simulados apresentaram dependência com variações do comprimento de onda utilizado, das dimensões dos acopladores, do índice de refração do dielétrico e do metal usado. Também foram considerados guias de onda segmentados (*Periodically Segmented Waveguide* - PSW). Os resultados mostram que a relação entre a distância de acoplamento e o comprimento de onda é diretamente proporcional, ou seja, quanto maior o comprimento de onda, maior a distância de acoplamento e a intensidade do campo elétrico no guia plasmônico. Com o aumento do espaçamento entre os guias, a distância de acoplamento também aumenta e conseqüentemente, o campo acoplado diminui. Ao comparar os resultados entre os guias segmentados e o equivalente contínuo, percebe-se que no PSW os comprimentos de acoplamento são menores, chegando a variações de 1 a 16% dependendo do metal e comprimento de onda utilizados. O esquema que apresentou menor distância de acoplamento ($L_c = 2,185\mu m$) era composto por um guia metálico de cobre com 15nm de espessura e por um guia dielétrico de largura de 400nm e índice de refração igual a 1,87, afastados de 400nm e operando a $\lambda = 1,50\mu m$. Enquanto que a configuração com guia de prata com 20nm de espessura e guia dielétrico de largura de 500nm e índice de refração igual a 1,87, afastados de 400nm e operando a $\lambda = 1,55\mu m$ apresentou maior intensidade de campo ($|E| = 6,9972$).

Palavras-chave: Acopladores Direcionais, Dispositivos Ópticos, Guias de Onda, MEF, *Plasmon Polariton* de Superfície, Plasmônica.

Abstract

In this work, directional hybrid couplers, composed by dielectric and metallic waveguides, were analyzed in details by computational simulations using Finite Element Method (FEM). The simulated models had some variations like wavelength, coupling dimensions, dielectric waveguide refractive index and metal besides the use of Periodic Segmented Waveguides (PSW). The results show that relation between coupling length and wavelength is directly proportional, ie, the greater wavelength the greater coupling distance and the electric field in the plasmonic guide. With the increase of the space between guides, the coupling length also increase and consequently the field decrease. Comparing the results between segmented guides and their continuous equivalent, it is noticed that in the PSW the coupling lengths are smaller, varying from 1 to 16% depending on the metal and wavelength used. The scheme that presented the lowest coupling distance ($L_c = 2,185\mu m$) was the metallic guide consisting of copper and 15nm thick and a continuous dielectric guide with width of 400nm and a refractive index of 1,87 are spaced from 400nm and operating at $\lambda = 1,50\mu m$. While the scheme that presented the highest field strength ($|E| = 6,9972$) was the metallic guide consisting of silver and 20nm thick and a continuous dielectric guide with width of 500nm and a refractive index of 1,87 are spaced from 400nm and operating a $\lambda = 1,55\mu m$.

Keywords: Diretional Coupler, FEM, Optic Devices, Plasmonic, Surface Plasmon Polaritons, Waveguides.

Lista de Figuras

1.1	Classificação evolutiva dos dispositivos de acordo com dimensões versus frequência de operação. (de Lima, 2014).	1
2.1	Guia de onda dielétrico (de Oliveira, 2012).	5
2.2	Representação dos supermodos de um acoplador de 02 guias uniformes (Sisnando, 2011).	6
2.3	Acoplamento entre dois guias: (a) Modo de cada Guia de Onda interferindo um no outro (b) Campo do Guia 1 sendo acoplado no Guia 2 (Sisnando, 2015).	7
2.4	ConFiguração de uma grade periódica (Noriega, 2012).	7
2.5	Distribuição das componentes de campo elétrico suportada por (a) um fino filme de prata de 10nm envolto por ar a um comprimento de onda de 655nm (conFiguração Isolante-Metal-Isolante - IMI) e (b) duas camadas de prata de 50nm separadas por ar em 10nm a um comprimento de onda de 655nm (conFiguração Metal-Isolante-Metal - MIM) (Bozhevolnyi and Søndergaard, 2007).	10
2.6	ConFiguração de uma grade periódica (Bozhevolnyi and Søndergaard, 2007).	11
2.7	Classificação dos materiais pela relação de sinal entre permissividade e permeabilidade (Park, 2015).	12
2.8	(a) Interface metal-dielétrico e perfil do modo SPP. (b) Profundidade de penetração (da Silva, 2011).	13
2.9	Relação de dispersão para luz se propagando em um gás de elétrons livres (Braitich, 2015).	14
2.10	Tipos de guias de onda plasmônico: (a) Metal dielétrico metal (MIM) (b) Dielétrico metal dielétrico (IMI) (c) Slot de metal (d) Dielétrico sob metal (e) Canal no metal (f) Nanofuro no metal (Alam, 2012).	15

- 2.11 Tipos de guias de onda híbrido plasmônico: (a) Esquema composto por filme metálico separado de uma camada de silício por fina camada de dielétrico (SiO_2 em geral) depositados em substrato formado por $SiO_2 + Si$ (b) Esquema composto por filme metálico separado de uma camada de silício por fina camada de dielétrico (SiO_2 em geral) depositados em substrato formado por SiO_2 (c) Esquema composto por filme metálico depositados em substrato formado por $Si + SiO_2 + Si$ (Alam, 2012). 16
- 2.12 Geometrias: (a) Dispositivo formado por 02 fitas horizontais: uma de ouro e outra de dielétrico, cercadas por SiO_2 (Liu et al., 2007b). (b) Dispositivo formado por 03 fitas horizontais: 01 de ouro e 02 de dielétrico, cercadas por SiO_2 (Liu et al., 2007a). (c) Estrutura composta por uma camada de níquel e outra de ouro em forma de V embutido pelo vácuo (Boltasseva et al., 2008). (d) Camada dielétrica de *Poly-Methyl-Methacrylate* (PMMA) depositada sobre película de ouro sob substrato de vidro (Grandidier et al., 2008). 17
- 2.13 Geometrias: (a) Guia de onda de ouro e Al_2O_3 com íons de érbio e substrato de safira (Verhagen et al., 2008). (b) fita de prata unida a 02 camadas de polímero de alto índice de refração e englobadas por um polímero de baixo índice de refração (Lee et al., 2009). (c) fitas de Au curvadas em 90° com raios variáveis, embebidas em BCB, depositadas em substrato de SiO_2 e envoltas por ar (Degiron et al., 2008). (d) fitas de Au e SU-8 curvadas em 90° com raios variáveis, embebidas em BCB, depositadas em substrato de SiO_2 e envoltas por ar (Degiron et al., 2009). (e) Guia de onda híbrido assimétrico formado por uma guia de onda de silício, um guia fino de sílica e uma fita de cobre revestidos por um polímero PMMA (Kim et al., 2009). (f) Duas fitas de Cobre separadas por um slot dielétrico e embebidas em Silica (Delacour et al., 2010) 19
- 2.14 Geometrias: (a) Cunha dielétrica de silício depositada em um substrato de prata envoltos em ar (Verhagen et al., 2010). (b) Acoplador com substrato de InP, seguido de uma camada de InGaAsP e uma de ouro (Summers and Ram, 2011). (c) Guia de onda de isolador-em-silício (SOI - *Silicon-Insulator*) com núcleo de silício, uma fina camada de dióxido de silício, uma fita de ouro com uma nanoponta (He et al., 2011). (d) Guia de onda dielétrico e outro plasmônico (elétrons evaporados de ouro) embebidos em SiO_2 (Kong et al., 2011). 20
- 2.15 Geometrias: (a) Ponta de silício acoplada a uma guia de onda de dióxido de silício. (Desiatov et al., 2011) (b) fitas de Au e SiN separadas por distancia D cercadas por camadas de SiO_2 com distintos índices de refração. (Liu et al., 2011) (c) Dispositivo vertical formado por guia de onda isolado de Si e um guia de onda híbrido plasmônico Al- SiO_2 -Si- SiO_2 -Al. (Choi and Kim, 2012) (d) Guia de onda de Si, uma fina camada de Ti e uma cadeia de nanopartículas de ouro (Fevrier et al., 2012). 22

- 2.16 Geometrias: (a) Acoplador composto de guia de onda SiO_2 -Si- SiO_2 e guia de onda SiO_2 -Si- SiO_2 -Ag- SiO_2 -Si- SiO_2 (Chen et al., 2012). (b) SPPs guiada ao longo do nanofio de ouro envolvido pelo vidro de sílica (Marini et al., 2013). (c) Pirâmide tridimensional com ponta nanofocalizadora plasmônica em forma de C (Lindquist et al., 2013). (d) Acoplador direcional plasmônico híbrido vertical MIM e IMI (Du and Chiou, 2014). 23
- 2.17 Geometrias: (a) Um guia de onda direto dielétrico e outro curvo híbrido (Dai et al., 2014). (b) Guia de ondas híbrido SiO_2 -Si-Ag- SiO_2 -Ag-Si- SiO_2 , um nanofio e um triângulo de prata (Hai et al., 2015). (c) Bastão cilíndrico de vidro de SiO_2 fundido, rodeado por duas camadas de nióbio, coberto com Al_2O_3 e embutido num líquido com um índice de refração predefinido (Wieduwilt et al., 2015). (d) Guia de onda de fita de silício espaçador de óxido fino e tampa metálica feita de cobre, ouro, prata ou alumínio (Kim and Qi, 2015). 24
- 2.18 Geometrias: (a) Triângulo isósceles de ouro em cima de guia de onda de silício com uma camada de pequena espessura de SiO_2 (Luo et al., 2015). (b) Ranhura cônica em forma de V introduzido em uma superfície de ouro, sílica e silício e rodeado de ar (Smith et al., 2015). (c) Uma fibra de índice degrau de sílica com núcleo de óxido de germânio em um guia de onda de ouro (Tuniz et al., 2016). (d) Nanopartícula de ouro inserida em núcleo de silício e envolvido pelo ar (Tellez-Limon et al., 2016). (e) Dois guias de onda metálicos separados e envoltos por ar e depositados em um filme metálico (Gan et al., 2017). (f) Guia de ondas de grafeno cônico com N multicamadas (Liu et al., 2016). 26
- 2.19 Geometrias: (a) Acoplador plasmônico formado por fibra óptica com casca de sílica, núcleo de material dielétrico com índice de refração pré-definido e nanofio de ouro com nanoponta focalizadora (Tuniz and Schmidt, 2016). (b) Um filme de ouro depositado em uma camada de vidro formando uma nanoponta focalizadora (Großa et al., 2016). (c) Um guia inferior curvado e outro superior reto (Chang and Huang, 2016). (d) Nano esfera de silício apoiada em substrato prata, separados por $g = 5nm$ e preenchido com SiO_2 de guia retangular silício (Zhang et al., 2017). (e) Cadeias de nanopartículas metálica (MNP - *Metallic Nanoparticle Chains*) elíptico de prata depositadas sobre guia de onda dielétrico (Si ou SiN_4) com substrato de SiO_2 (Magno et al., 2017). (f) Estrutura formada por camada de SiO_2 e camada MIM (Ag-dielétrico-Ag) (Dutta et al., 2018). 28
- 2.20 Geometrias: (a) Estrutura com núcleo de Si revestido com SiO_2 e 02 fitas Ag nas diagonais (Wang et al., 2017). (c) Fina fita de alumínio embebida por Si amorfo e separada de camada de Si por $d = 2\mu m$ preenchido por SiO_2 (Sturlesi et al., 2018). (d) fita metálica assimétrica com uma cunha em formato de V (Gan et al., 2018). (e) Guia de onda MIM (Ag + Diamante) (Liu et al., 2018). (f) Um esquemático composto por 03 partes: uma grade acopladora onde há a excitação, um guia de onda plasmônico com formado por Si, uma camada adesiva de Ti e Au e um fotodetector MSM (Metal-Semicondutor-Metal) (Panchenko et al., 2018) 30

3.1	Esquema do acoplador híbrido plasmônico composto por guia de onda dielétrico e metálico, envoltos por substrato.	35
3.2	Malha simulada para os parâmetros iniciais do acoplador híbrido plasmônico composto por guia de onda dielétrico e metálico envoltos por substrato.	37
3.3	Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico com $w = 500nm$ e $n_d = 1,87$ distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (a) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$	37
3.4	Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico com $w = 500nm$ e $n_d = 1,87$ distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (a) cobre operando a $\lambda = 1,60 \mu m$	38
3.5	Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico com $w = 500nm$ e $n_d = 1,87$ distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (a) cobre operando a $\lambda = 1,50 \mu m$	38
3.6	Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico com $w = 500nm$ e $n_d = 1,87$ distante de $d = 200nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (a) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$	39
3.7	Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico com $w = 500nm$ e $n_d = 1,87$ distante de $d = 300nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (a) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$	40
3.8	Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico com $w = 500nm$ e $n_d = 1,87$ distante de $d = 500nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (a) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$	40
3.9	Gráfico da distância de acoplamento (L_c) versus espaçamento entre os guias dielétrico e metálico (d) para $\lambda = 1,50, 1,55$ e $1,60 \mu m$ e guia metálico composto por (a) prata, (c) ouro e (e) cobre e do campo ($ E $) versus espaçamento entre os guias dielétrico e metálico (d) para (b) prata, (d) ouro e (f) cobre.	41
3.10	Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico com $w = 500nm$ e $n_d = 1,87$ distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 20nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (a) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$	42
3.11	Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico com $w = 500nm$ e $n_d = 1,87$ distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 25nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (a) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$	42

3.12	Gráfico da distância de acoplamento (L_c) versus espessura do guia metálico (t) para $\lambda=1,50, 1,55$ e $1,60 \mu m$ e guia metálico composto por (a) prata, (c) ouro e (e) cobre e do campo ($ E $) versus espessura do guia metálico (t) para (b) prata, (d) ouro e (f) cobre.	43
3.13	Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico com $w = 300nm$ e $n_d = 1,87$ distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (a) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$	44
3.14	Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico com $w = 400nm$ e $n_d = 1,87$ distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (a) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$	44
3.15	Gráfico da distância de acoplamento (L_c) versus largura do guia dielétrico (w) para $\lambda=1,50, 1,55$ e $1,60 \mu m$ e guia metálico composto por (a) prata, (c) ouro e (e) cobre e do campo ($ E $) versus largura do guia dielétrico (w) para (b) prata, (d) ouro e (f) cobre.	45
3.16	Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico com $w = 500nm$ e $n = 1,746$ (Al_2O_3) distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (a) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$	46
3.17	Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico com $w = 500nm$ e $n = 1,997$ (Si_3N_4) distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (a) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$	46
3.18	Gráfico da distância de acoplamento (L_c) versus índice de refração do guias dielétrico (n) para $\lambda=1,50, 1,55$ e $1,60 \mu m$ e guia metálico composto por (a) prata, (c) ouro e (e) cobre e do campo ($ E $) versus índice de refração do guias dielétrico (n) para (b) prata, (d) ouro e (f) cobre.	47
3.19	Esquema do acoplador híbrido plasmônico com guia de onda segmentado (PSW).	48
3.20	Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico PSW com $w = 300nm$, $\eta = 50\%$ e $n_{eq} = 2,460$ ($SiO_2 + Si$) distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (c) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$	49
3.21	Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico PSW com $w = 300nm$, $\eta = 50\%$ e $n_{eq} = 1,953$ ($Si_3N_4 + SiO_2$) distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (c) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$. . .	49
3.22	Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico PSW com $w = 300nm$, $\eta = 50\%$ e $n_{eq} = 1,604$ ($Al_2O_3 + SiO_2$) distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (c) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$. . .	50

3.23	Gráfico da distância de acoplamento (L_c) versus índice de refração efetivo do guias dielétrico segmentado (n_{eq}) com <i>duty cycle</i> $\eta = 50\%$ para $\lambda=1,50, 1,55$ e $1,60 \mu m$ e guia metálico composto por (a) prata, (c) ouro e (e) cobre e do campo ($ E $) versus índice de refração efetivo do guias dielétrico segmentado (n_{eq}) com <i>duty cycle</i> $\eta = 50\%$ para $\lambda=1,50, 1,55$ e $1,60 \mu m$ e guia metálico composto por (b) prata, (d) ouro e (f) cobre.	51
3.24	Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico PSW com $w = 300nm$, $\eta = 25\%$ e $n_{eq} = 1,952$ ($SiO_2 + Si$) distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (c) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$	52
3.25	Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico PSW com $w = 300nm$, $\eta = 25\%$ e $n_{eq} = 1,699$ ($Si_3N_4 + SiO_2$) distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (c) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$	52
3.26	Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico PSW com $w = 300nm$, $\eta = 25\%$ e $n_{eq} = 1,524$ ($Al_2O_3 + SiO_2$) distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (c) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$	53
3.27	Gráfico da distância de acoplamento (L_c) versus índice de refração efetivo do guias dielétrico segmentado (n_{eq}) com <i>duty cycle</i> $\eta = 25\%$ para $\lambda=1,50, 1,55$ e $1,60 \mu m$ e guia metálico composto por (a) prata, (c) ouro e (e) cobre e do campo ($ E $) versus índice de refração efetivo do guias dielétrico segmentado (n_{eq}) com <i>duty cycle</i> $\eta = 25\%$ para (b) prata, (c) ouro e (f) cobre.	54
3.28	Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico CWG com $w = 300nm$ e $n = 2,460$ distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (c) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$	55
3.29	Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico CWG com $w = 300nm$ e $n = 1,953$ distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (c) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$	55
3.30	Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico CWG com $w = 300nm$ e $n = 1,604$ distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (c) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$	56
B.1	Índice de refração versus comprimento de onda da Prata segundo Johnson and Christy. Em azul, parte imaginária k e em vermelho, parte real n . (Johnson and Christy, 1972)	69
B.2	Índice de refração versus comprimento de onda do Ouro segundo Johnson and Christy. Em azul, parte imaginária k e em vermelho, parte real n . (Johnson and Christy, 1972)	69

B.3 Índice de refração versus comprimento de onda do Cobre segundo Johnson and Christy. Em azul, parte imaginária k e em vermelho, parte real n . (Johnson and Christy, 1972) 70

Lista de Tabelas

2.1	Estado da arte de acoplamento entre guias dielétricos e plasmônicos.	32
3.1	Parâmetros da configuração inicial.	36
3.2	Propriedade dos metais com variação do comprimento de onda.	36
3.3	Comparativo da distância de acoplamento variando o comprimento de onda para cada metal.	39
3.4	Valores do índice de refração equivalente do guia PSW.	48
3.5	Valores comparativos do índice de refração equivalente do guia PSW $\eta = 50\%$ para $\lambda = 1,55\mu m$	56

Lista de Nomenclaturas e Abreviações

ABC	<i>Absorbing Boundary Condition</i>
AN	<i>Abertura Numérica</i>
CWG	<i>Continuous Waveguide</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
HPWG	<i>Hybrid Plasmonic Waveguide</i>
LR-SPP	<i>Long-Range Surface Plasmons Polaritons</i>
LSP	<i>Localized Surface Plasmons</i>
LSPR	<i>Localized Surface Plasmons Resonance</i>
MEF	Método de Elementos Finitos
MZI	<i>Mach-Zender Interferometer</i>
PML	<i>Perfect Matched Layers</i>
PSW	<i>Periodically Segmented Waveguide</i>
SOI	<i>Silicon-on-Insulator</i>
SP	<i>Surface Plasmons</i>
SPP	<i>Surface Plasmons Polaritons</i>
SPPR	<i>Surface Plasmons Polaritons Resonance</i>
SPR	<i>Surface Plasmons Resonance</i>
SR-SPP	<i>Short-Range Surface Plasmons Polaritons</i>

TE	Transversal Eléctrico
TEM	Transversal Eletromagnético
TM	Transversal Magnético

Lista de Símbolos

Ag	Símbolo do elemento químico Prata.
Au	Símbolo do elemento químico Ouro.
B	Campo Magnético
c	Velocidade da Luz
D	Intensidade do Campo Elétrico
E	Campo Elétrico
η	<i>Duty Cycle</i>
Nb	Símbolo do elemento químico Nióbio.
Si	Símbolo do elemento químico Silício.
n	Índice de Refração
λ	Comprimento de Onda
λ_0	Comprimento de Onda no espaço livre
L_c	Distância de acoplamento.
ε	Permissividade Elétrica
μ	Permeabilidade Magnética
ω_p	Frequência de Plasma

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivo	3
1.2.1	Objetivo Geral	3
1.2.2	Objetivos Específicos	3
1.3	Metodologia	3
1.4	Organização do Texto	4
2	Revisão Bibliográfica	5
2.1	Guias de Onda Dielétricos	5
2.2	Guia de Onda Segmentados	7
2.3	Plásmons Polárítions de Superfície	8
2.3.1	Permissividade elétrica dos Guias Metálicos	11
2.4	Guias de onda Plasmônicos	14
2.5	Estado da Arte	16
3	Resultados e Discussões	35
3.1	Acoplador Híbrido Plasmônico	35
3.2	Acoplador Híbrido Plasmônico Segmentado	48
4	Considerações Finais	57
4.1	Conclusões	57
4.2	Trabalhos futuros	58
	Referências Bibliográficas	59
A	Apêndice - Publicações	67

A.1	Artigos Publicados Relacionados ao Projeto	67
A.1.1	Publicação em Congresso Internacional	67
B	Apêndice	68
B.1	Índice de Refração	68

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Para atender a crescente demanda da utilização de dados pelos usuários, a engenharia provê inovações, tais como a utilização de fibras ópticas, as quais possuem capacidade de transmissão de dados na grandeza de Terabits e não sofrem interferência eletromagnética. Entretanto, essa alta taxa de transmissão é estancada quando se depara com circuitos eletrônicos, uma vez que a conversão entre os domínios óptico e elétrico faz-se necessária.

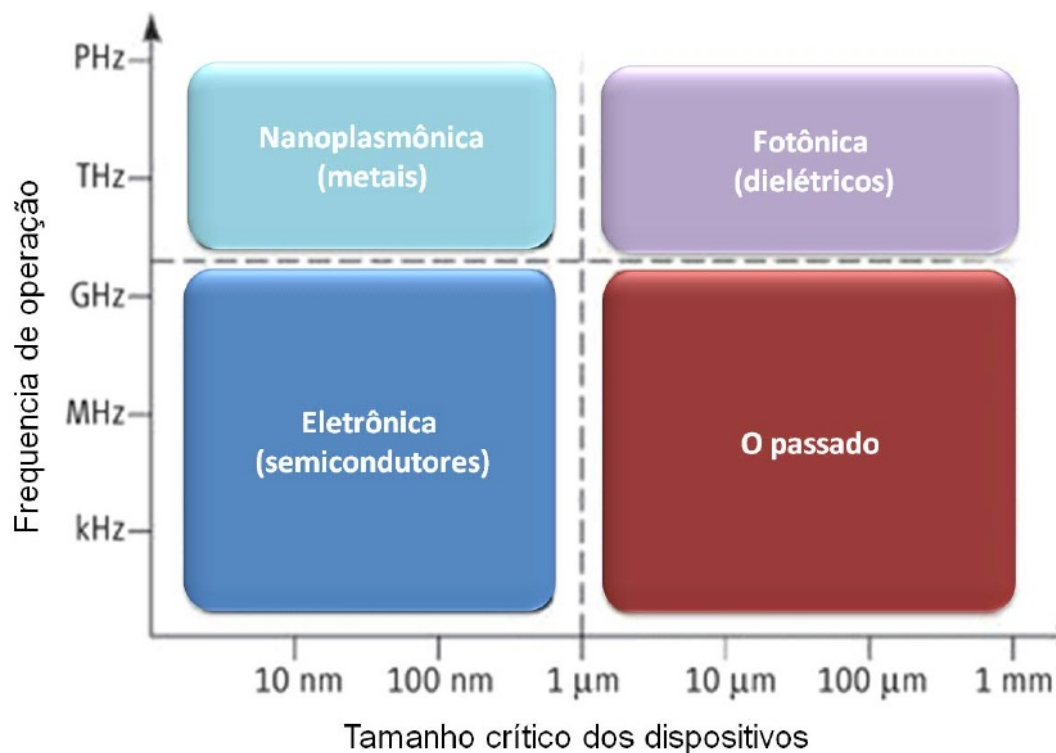


Figura 1.1: Classificação evolutiva dos dispositivos de acordo com dimensões versus frequência de operação. (de Lima, 2014).

Para resolver esse problema, surge a fotônica que possibilita fontes (LEDs, diodos

superluminescentes e lasers) e detectores de sinais ópticos (fotodetectores baseados em efeitos térmicos, químicos, quânticos, fotoelétricos e outros). Dentro desse contexto, a dimensão dos dispositivos é restringida pelo limite de difração. Esta limitação é da ordem do comprimento de onda λ_0/n onde λ_0 é comprimento de onda no espaço livre e n é o índice de refração (Takahara et al., 1997).

Assim, devido ao limite de difração, a fotônica é impedida de acompanhar o estado da arte da eletrônica moderna. Uma maneira de superar essa questão é a utilização de estruturas plasmônicas, onde é possível propagar ondas eletromagnéticas com dimensões abaixo do limite de difração (da Silva, 2011). Os *Plasmon Polariton* de Superfície (SPP - *Surface Plasmon Polariton*) são gerados na interface metal-dielétrico, onde o modo SPP é guiado ao longo da interface como uma onda evanescente com o máximo de campo na interface. Dessa forma, é possível traçar um gráfico entre o tamanho crítico dos dispositivos e a frequência de operação conforme mostrado na Figura 1.1.

Diversas estruturas foram propostas para guias de onda SPP, tais como estruturas 1D dielétrico/metal/dielétrico (IMI) ou metal/dielétrico/metal (MIM) e estruturas 2D incluindo nanofios e filmes metálicos (Novotny and Hecht, 2006). Os nanofilmes metálicos foram destacados nas pesquisas devido a suas propriedades quando combinados com materiais dielétricos. Na literatura, há trabalhos envolvendo SPP utilizando finas camadas de metal, em sua maioria SiO_2 é usado como material dielétrico e metais nobres como ouro e prata são usados como nanofilme (Liu et al., 2007b), (Boltasseva et al., 2008), (He et al., 2011) (Kong et al., 2011), (Desiatov et al., 2011), (Liu et al., 2011), (Fevrier et al., 2012), (Marini et al., 2013), (Luo et al., 2015), (Tellez-Limon et al., 2016). Porém, existem esquemas com diferentes materiais usados no nanofilme como nióbio (Wieduwilt et al., 2015), alumínio (Choi and Kim, 2012) e cobre (Delacour et al., 2010). Recentemente, os dispositivos plasmônicos incluem nanopontas metálicas que focalizam a luz (He et al., 2011), (Desiatov et al., 2011), (Gao et al., 2010) e podem ser usados em litografia e óptica.

Além disso, o uso de SPPs é uma oportunidade promissora para minimizar o tamanho dos componentes optoeletrônicos, aumentar as taxas de processamento integrando eletrônicos e nanofotônicos e permitir o uso de aplicações na detecção (Alavirad et al., 2014), (Hentschel et al., 2012), óptica não linear e fotovoltaica (Atwater and Polman, 2010), guias de onda seletivos em frequência (Volkov et al., 2007), (Holmgard et al., 2009), moduladores (Fang and Sun, 2015), portas lógicas OR e NOT (Fang and Sun, 2015), interferômetro de Mach-Zehnder (MZI - *Mach-Zender Interferometer*) (Charbonneau, 2001), (Charbonneau et al., 2005), (Charbonneau et al., 2006), (Fang and Sun, 2015), chaves ópticas (Bozhevolnyi et al., 2006), (Yamazaki et al., 2007), (Fang and Sun, 2015), redes de Bragg (Jetté, 2003), (Bozhevolnyi et al., 2005), (Jetté-Charbonneau et al., 2005), nano-lasers (Gather et al., 2010), biossensores (Homola et al., 2003), (Homola, 2003), (Homola, 2008), (Nesterov et al., 2008). Outros estudos incluem materiais magnéticos (Sarid, 1984), (Sepúlveda et al., 2006), (Khurgin, 2006), materiais eletro-ópticos (Liao and Shyu, 2000), (Liu and Xiao, 2006), cristais fotônicos (Konopsky and Alieva, 2006), (Konopsky and Alieva, 2009), e dispositivos com nanofios de metal (Wu et al., 2008b), (Wu et al., 2008a).

No campo da medicina (Gobin et al., 2007), há estudos visando a eliminação de células cancerígenas sem a necessidade de extrair todo o tecido afetado. Na área de energia solar, é possível aumentar a eficiência e diminuir a espessura de células solares com o acréscimo de nanoestruturas de metal a uma junção semicondutora. Dessa forma,

os fótons perduram por um tempo maior próximo à região de depleção (Amaral, 2012). Para os metamateriais, os *plasmons* são utilizados para confeccionar, por exemplo, lentes perfeitas ou capas de invisibilidade (alteração do índice de refração) (Amaral, 2012).

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é a análise e a proposta de acopladores direcionais híbridos que são formados por um guia de onda dielétrico contínuo ou segmentado com largura w e um guia de onda metálico com espessura t afastados pela distância d . O sinal luminoso inserido no guia de onda dielétrico se acoplará fortemente ao guia metálico. A partir das alterações propostas na geometria dos guias (espessura e distância entre os guias) e características ópticas como índice de refração, a eficiência e a distância de acoplamento sofrerão mudanças.

1.2.2 Objetivos Específicos

Durante a realização deste trabalho espera-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Estudar os modos de propagação, bem como características de acoplamento em guias dielétricos e metálicos;
- Determinar a distância de acoplamento nos modelos analisados;
- Avaliar a influência da variação da distância de acoplamento e eficiência do acoplamento quando os parâmetros geométricos e ópticos são alterados;
- Analisar e propor modelo de acoplador híbrido baseado em guias de ondas contínuos e com segmentos retangulares;

1.3 Metodologia

Para o estudo dos acopladores direcionais plasmônicos, o software GiD é utilizado para criar a estrutura e as malhas dos elementos finitos, o software Matlab é usado para o cálculo dos campos nessas estruturas e para geração dos gráficos resultantes, o software Surfer. Uma máquina Intel Core i5 CPU 2.20 GHz e 8 GB RAM de memória é usada nas simulações.

As simulações usam o método de elementos finitos (MEF) cujo domínio computacional possui as dimensões $20 \mu m \times 11 \mu m$. Visando evitar reflexões indesejadas a partir dos limites da janela computacional, são utilizadas PMLs (*Perfect Matched Layers*). A geometria do acoplador consiste em um guia de onda dielétrico de largura w constituído por material com índice de refração pré-definido n_d e um guia de onda metálico com espessura bem fina t distantes de um comprimento d , envoltos por um substrato de sílica. Também é utilizado um guia segmentado com variação no *duty cycle*. A direção de propagação da onda é o eixo x .

1.4 Organização do Texto

A proposta de dissertação é estruturada da seguinte forma:

No capítulo 1 se apresenta uma introdução do problema, os objetivos do trabalho e a metodologia utilizada no estudo do acoplador direcional plasmônico.

No capítulo 2 são apresentados os acopladores ópticos, abordando o estado da arte dos estudos relacionados ao tema. Faz-se breve introdução do fenômeno da plasmônica.

No capítulo 3 são apresentados e discutidos os resultados obtidos.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Guias de Onda Dielétricos

Guias de onda são dispositivos que possibilitam a transmissão do sinal óptico confinado dentro do núcleo devido ao fenômeno da reflexão interna. Dessa forma, surge o conceito de abertura numérica (AN), a partir da Lei de Snell, que representa o ângulo de incidência máximo em relação ao eixo do guia de onda para que o sinal óptico sofra a reflexão interna total no interior do núcleo e se propague ao longo deste através de sucessivas reflexões. Também é necessário que o guia de onda seja formado por materiais dielétricos com índices de refração distintos como descrito na Figura 2.1, onde n_1 é o índice de refração do núcleo e n_2 da casca (de Oliveira, 2012).

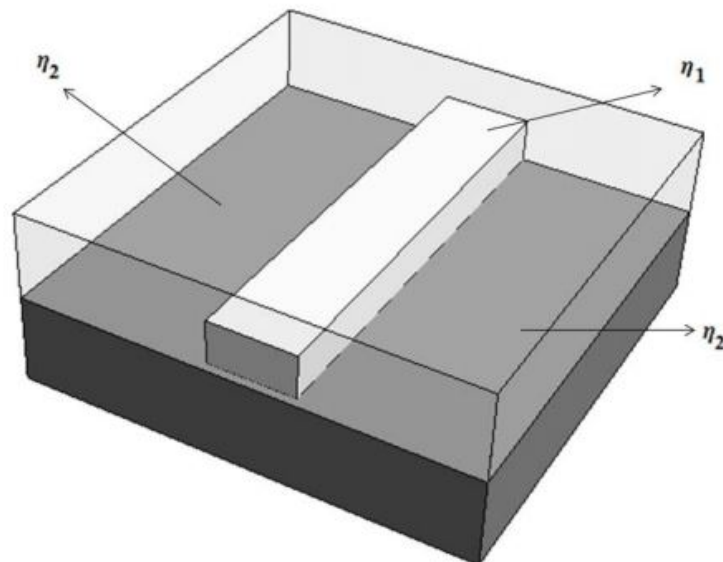


Figura 2.1: Guia de onda dielétrico (de Oliveira, 2012).

Um guia de onda convencional planar e contínuo (*Continuous Waveguide* - CWG) confina a luz no núcleo, o qual possui $n_1 > n_2$, ocasionando uma grande dispersão devido

às imperfeições das paredes de contorno do núcleo-casca. Para sanar esse problema, deve-se diminuir substancialmente a área do núcleo. Assim, o campo na fronteira núcleo-casca será reduzido (Sisnando, 2015).

Com base nas equações de Maxwell e admitindo as condições de contorno inerentes ao tipo de guia, são determinados os modos de propagação. Os modos de propagação possuem um dado perfil de campo elétrico e de campo magnético e obedecem a certas condições de corte. Somente uma quantidade finita de modos são permitidos nos guias de ondas e em geral, são do tipo transversal, onde a componente do campo elétrico (modo TE) ou do campo magnético (modo TM) não existe na direção de propagação da onda, apenas transversalmente, e do tipo híbrido (modo EH e HE), que tem componentes do campo elétrico e do campo magnético na direção de propagação da onda. Em resumo, supondo que a propagação seja na direção z (de Oliveira, 2012):

- Modo TE (ou tipo H): apenas a componente longitudinal do campo magnético, $H_z \neq 0$ e $E_z = 0$;
- Modos TM (ou tipo E): apenas a componente longitudinal do campo elétrico, $H_z = 0$ e $E_z \neq 0$;
- Modo TEM (ou tipo EH / HE): condição particular onde não há componente longitudinal, $H_z \neq 0$ e $E_z \neq 0$;

É possível realizar uma correlação com a óptica geométrica: os modos TE e TM correspondem a raios meridionais, enquanto que os modos híbridos resultam da propagação de raios inclinados (de Oliveira, 2012). A teoria do modo normal considera o acoplador como um guia de onda suportando dois modos ou supermodos: o modo par (simétrico) e o modo ímpar (assimétrico) como mostra a Figura 2.2. A transferência de potência óptica entre os dois núcleos é então descrita através da diferença de fase relativa entre os dois supermodos adquirida durante a propagação (de Oliveira, 2012).

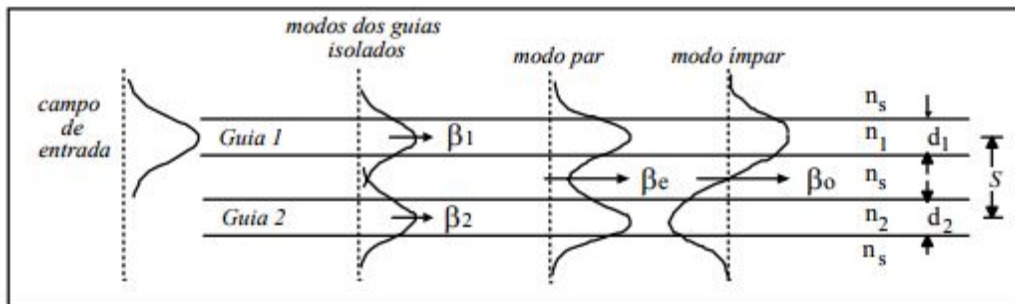


Figura 2.2: Representação dos supermodos de um acoplador de 02 guias uniformes (Sisnando, 2011).

A teoria de modos acoplados se fundamenta na interferência dos campos evanescentes de dois guias de ondas próximos. A representação do acoplamento é mostrada na Figura 2.3.

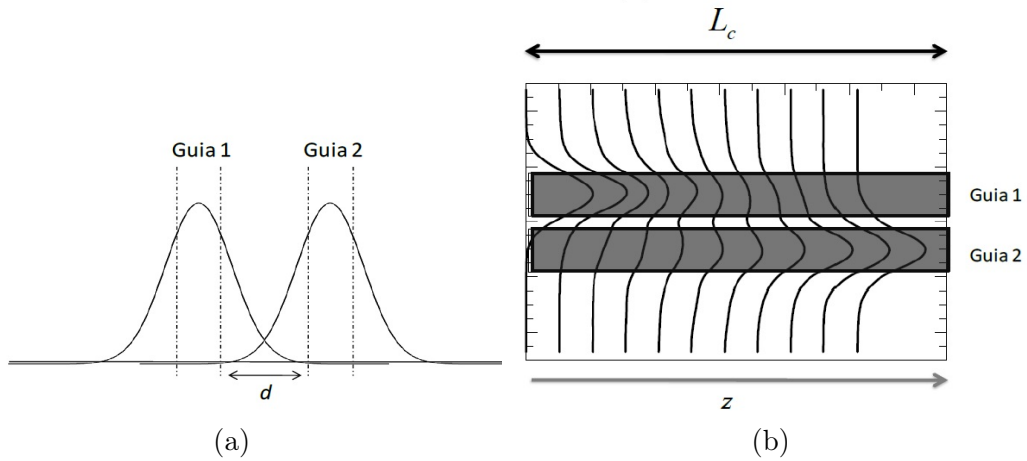


Figura 2.3: Acoplamento entre dois guias: (a) Modo de cada Guia de Onda interferindo um no outro (b) Campo do Guia 1 sendo acoplado no Guia 2 (Sisnando, 2015).

2.2 Guia de Onda Segmentados

Os guias de onda convencionais apresentam perdas de propagação consideráveis na grandeza de 8 dB/cm, além das perdas por espalhamento e imperfeições nas bordas dos guias (Bock et al., 2010). Visando solucionar essa questão, surgem os guias de ondas segmentados ou PSW (*Periodically Segmented Waveguide*). Nessa nova estrutura, a luz é confinada no núcleo, o qual é composto de segmentos formados de silício e um material de baixo índice de refração, possuindo índice de refração equivalente n_{eq} mais elevado do que o substrato. Assim, ao ser injetada luz neste núcleo, devido ao fenômeno de reflexão total interna, esta se propaga (de Oliveira, 2012).

As estruturas periódicas menores que um comprimento de onda foram estudadas em 1940. Na década de 70, artigos de Dabby (Dabby et al., 1972), Stoll (Stoll and Yariv, 1973) e Peng (Peng et al., 1975) introduziram a idéia de guias de onda segmentados. Essas estruturas periódicas possuem simetria ao longo do eixo longitudinal, diferentemente dos guias de onda contínuos (*Continuous Waveguide - CWG*) que tem simetria translacional, uma vez que não há alteração no índice de refração na direção de propagação (Noriega, 2012).

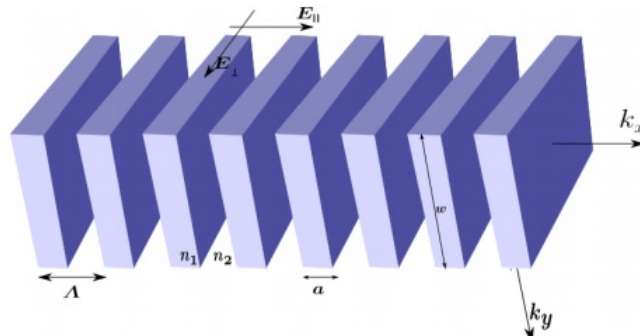


Figura 2.4: ConFiguração de uma grade periódica (Noriega, 2012).

Um guia PSW é geralmente formado por uma estrutura periódica de dois ou mais materiais dielétricos. A partir da Figura 2.4, pode-se notar que o índice de refração do núcleo varia periodicamente de n_1 para n_2 na direção do vetor k_x . Nota-se também que o comprimento do material com índice de refração n_1 é igual a a e o material n_2 , $\Lambda - a$, onde Λ é dito como período da grade. Outro parâmetro importante é o ciclo de serviço ou *duty cycle* (η) que é a razão do comprimento de material com índice de refração n_1 com o período da grade (Λ). Em um guia PSW, o modo varia periodicamente ao longo da direção de propagação, enquanto que em um guia CWG, o modo de propagação permanece invariável em função da distância. (Noriega, 2012).

A condição de Bragg indica o comprimento de onda que é mais fortemente refletido em uma estrutura com período Λ e é dada pela Equação 2.1 (considerando o ângulo de incidência igual a 90° (Noriega, 2012)). Neste trabalho, utilizar-se-á comprimentos de onda bem maiores do que a condição de Bragg.

$$\lambda = 2n_{eq}\Lambda_{SWG} \quad (2.1)$$

O índice de refração equivalente n_{eq} de um PSW é o valor para o qual o comportamento do campo é equivalente ao de um guia CWG com mesmas dimensões, desde que o período da grade seja inferior ao do comprimento de onda. Esse valor é calculado através da Equação 2.2. Dessa forma, o sinal óptico se propaga nessa estrutura periódica como se fosse em um meio homogêneo com permissividade média.

$$\eta_{eq} = n_{clad} + \eta\Delta n \quad (2.2)$$

Dessa maneira, ao modificar a largura a ou período Λ destes materiais, o índice de refração efetivo do núcleo do guia de onda pode ser manipulado, uma das grandes vantagens do uso de PSW, além de redução nas perdas por espalhamento.

Para um comprimento de onda de $\lambda = 1,55\mu m$, o período da estrutura deve ser da ordem de $300nm$. Esta estrutura periódica pode operar em três regimes diferentes, dependendo de Λ e λ . A primeira região é a de difração, onde o feixe é espalhado para diferentes ordens. A segunda é reflexão, onde o feixe é refletido de volta. Por fim, a terceira é a região de subcomprimento de onda, onde os efeitos de difração são suprimidos.

2.3 Plásmons Polártons de Superfície

A partir de 1902, o professor Robert W. Wood iniciou as pesquisas sobre o efeito de *plasmons*. Dois anos depois, Maxwell e Garnett, baseados no modelo de Drude para a permissividade elétrica dos metais, puderam explicar as cores observadas em vidro dopado com partículas metálicas. O trabalho sobre a teoria de espalhamento da luz por nanopartículas esféricas é publicado por Gustav Mie em 1908 (de Lima, 2014).

Efetivamente o termo *plasmons* surge em meados da década de 50 batizado por David Pines. Essa denominação foi dada em decorrência das perdas nas oscilações coletivas de elétrons livres se deslocando na superfície de metais. Em 1957, o termo *polariton* é incluído por Fano para denominar uma oscilação acoplada entre *plasmons* e a onda

eletromagnética. Nesse mesmo ano, Ritchie apresenta as equações que consideram as interações coletivas e individuais entre partículas na superfície (de Lima, 2014).

Ritchie, em 1968, demonstrou empiricamente a existência dos *plasmons* de superfície (*Surface Plasmon - SP*) que são descritos como o acoplamento de oscilações coletivas de elétrons livres existentes no metal e a luz propagada na superfície do mesmo. Quando a onda incidente sofre reflexão interna total na interface metal/dielétrico, o campo evanescente é gerado e excitará os SPs. Estes se propagam na direção paralela a interface metálica, onde parte do sinal é absorvida (de Lima, 2014). A partir dessa interação, ocorre a ressonância de *plasmons* de superfície (*Surface Plasmons Ressonance - SPR*), que pode ser definida como a ressonância formada pela interação da luz com filmes finos metálicos.

Utilizando as equações de Maxwell, demonstra-se que SPPs ocorrem na interface entre o espaço livre ou material com constante dielétrica positiva e um material com constante dielétrica negativa (usualmente um condutor a uma frequência abaixo da frequência de plasma). A propagação do modo SPP ao longo da interface entre o metal e o material dielétrico possui propriedades resultantes da combinação de onda eletromagnética (luz) e oscilação de densidade eletrônica (da Silva, 2011).

Os *Plasmons* de Superfície Localizados (*Localized Surface Plasmons - LSP*) acontecem quando o acoplamento plasmônico da onda eletromagnética ocorre em uma nanopartícula esférica metálica cujo diâmetro é muito menor que o comprimento de onda incidente. Já os *Plasmons Polaritons* de Superfície (*Surface Plasmons Polaritons - SPP*) são obtidos quando a onda incide em um filme metálico, onde a propagação fica confinada na superfície desse filme. Como em ambos os casos as condições de ressonância são possíveis, podem ser classificados como Ressonância *Plasmons Polaritons* de Superfície (*Surface Plasmons Polaritons Ressonance - SPPR*) e Ressonância de *plasmons* de Superfície Localizados (*Localized Surface Plasmons Ressonance - LSPR*), respectivamente (Novotny and Hecht, 2006).

Como o amortecimento SPP é determinado pelo componente SPP longitudinal, o modo SPP simétrico exibindo a simetria ímpar do campo longitudinal (que, desse modo, cruza o zero alterando seu sinal) no plano médio do filme metálico, apresenta atenuação consideravelmente menor que o modo SPP anti-simétrico. Por outro lado, o modo SPP anti-simétrico exibe a simetria uniforme do campo elétrico longitudinal, maximizando a densidade de energia eletromagnética dentro do metal (ver, por exemplo, Figura 2.5), diminuindo assim a propagação do modo e aumentando sua atenuação. O modo SPP simétrico é, portanto, convencionalmente chamado de SPP de longo alcance (LR-SPP - *Long-Range*) e o anti-simétrico, o SPP de curto alcance (SR-SPP - *Short-Range*) (Bozhevolnyi and Søndergaard, 2007).

LR-SPPs possuem frações menores de campo no metal e tem uma mais baixa perda, no entanto eles são apenas fracamente ligados ao metal, e simplesmente se comportam como ondas planas, se a espessura do metal é reduzida à nanoescala. Em contraste, SR-SPPs estão fortemente ligados ao metal e mostram um confinamento aumentando a superfície do metal para uma espessura de película de redução. Para o caso de nanofios, SR-SPP é dada pela polarização TM_0 e LR-SPP pelo modo HE_1 (Marini et al., 2013).

Os LR-SPPs possuem frações menores de campo no metal e têm menor perda, no entanto, eles são apenas ligeiramente ligados ao metal, e simplesmente se comportam como ondas planas se a espessura do metal for reduzida à nanoescala (Burke et al., 1986).

Em contrapartida, os SR-SPPs estão bem ligados ao metal e mostram um crescente confinamento na superfície metálica para uma espessura de película redutora (Burke et al., 1986). Isso torna o SR-SPP particularmente vantajoso para uma série de aplicações, no entanto, eles são difíceis de se acostumar devido ao seu grande modo efetivo, conforme discutido abaixo.

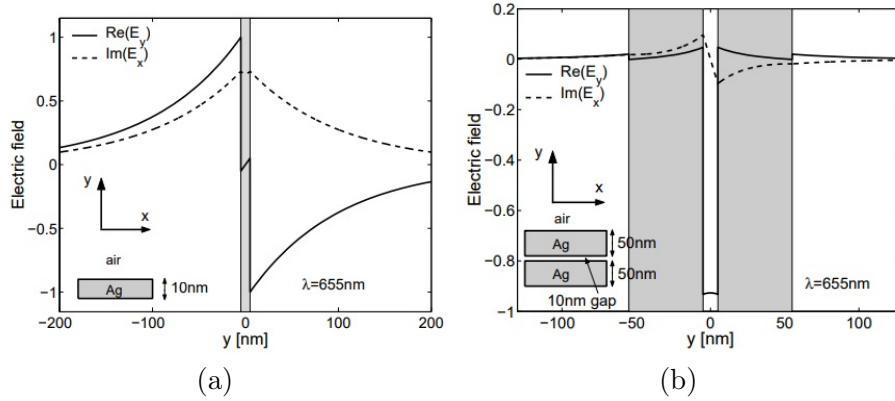


Figura 2.5: Distribuição das componentes de campo elétrico suportada por (a) um fino filme de prata de 10nm envolto por ar a um comprimento de onda de 655nm (configuração Isolante-Metal-Isolante - IMI) e (b) duas camadas de prata de 50nm separadas por ar em 10nm a um comprimento de onda de 655nm (configuração Metal-Isolante-Metal - MIM) (Bozhevolnyi and Søndergaard, 2007).

De um modo geral, devido a seus vetores de ondas comparativamente grandes, os modos SR-SPP não podem ser excitados através de excitação de espaço livre e são necessários esquemas de acoplamento mais sofisticados, como acoplamento de onda evanescente (Otto, 1968), acopladores de grade (Devaux et al., 2003) e cônicos (Wieduwilt et al., 2015). Essas técnicas são amplamente utilizadas, mas sofrem com uma estreita largura de banda espectral. O grande desajuste de impulso é um problema chave, já que os modos SR-SPP geralmente possuem valores de índice muito maiores que os dos sistemas dielétricos típicos. Outro método de excitação é o acoplamento de fogo final (Stegeman et al., 1983), (Gosciniak et al., 2010), dependendo de uma excitação direta do modo plasmônico por um feixe incidente, seja a partir de uma guia de ondas dielétricas ou espaço livre. Esta técnica, comumente usada em fibra óptica, requer uma correspondência dos campos dos modos envolvidos, o que é difícil quando as guias de ondas plasmáticas têm dimensões de sub-comprimento de onda (Chen et al., 2011). Além disso, o acoplamento de fim de fogo não permite a excitação seletiva de um modo desejado, tornando essa abordagem inviável para aplicativos que exigem SR-SPPs (Tuniz and Schmidt, 2016).

Bozhevolnyi (Bozhevolnyi and Søndergaard, 2007) fez um cálculo comparativo entre os resultados dos modos LR-SPP e SR-SPP para um cenário de um fino filme de ouro cercado por ar. Os parâmetros usados nesse esquema foram o comprimento de onda de $\lambda = 775nm$, a permissividade do ouro em $\epsilon_m = -23,6 + 1,69i$, o índice de modo efetivo, $n_{eff} = Re(k_{sp})/k_0$, e comprimento de propagação $L = [2Im(k_{sp})]^{-1}$. Nota-se que as soluções explícitas resultam em valores precisos do índice de modo efetivo e do comprimento de propagação para LR-SPP e SR-SPP em toda a gama de espessuras de filme, até a espessura de 10 nm (Figura 2.6).

Em óptica integrada, a utilização de plasmons de superfície para a manipulação

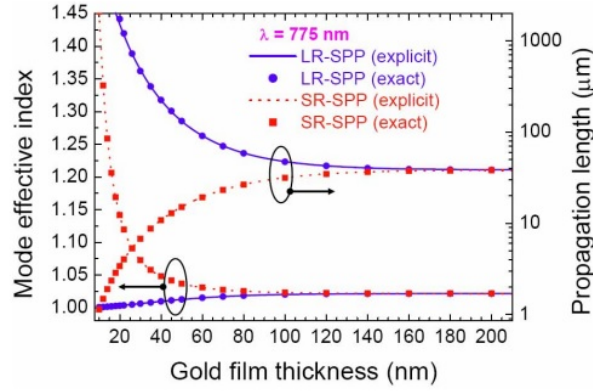


Figura 2.6: ConFiguração de uma grade periódica (Bozhevolnyi and Søndergaard, 2007).

e roteamento da luz em escalas abaixo do limite de difração possibilita o desenvolvimento de dispositivos fotônicos ultracompactos. Como consequência, vislumbra-se que a implementação de guias plasmônicos capazes de realizar modulação, acoplamento e chaveamento óptico serviria não somente para aumentar a velocidade de transmissão de dados entre componentes eletrônicos, como também tornaria possível o desenvolvimento de circuitos integrados totalmente ópticos com a mesma escala de integração dos circuitos eletrônicos atuais (da Silva, 2011).

2.3.1 Permissividade elétrica dos Guias Metálicos

A permissividade elétrica dos metais é descrita na literatura pelo modelo de Drude. Nesse modelo, uma densidade de n elétrons livres se movem em estruturas de íons positivos e é amortecida por colisões entre os elétrons e os íons. Ao ser aplicado um campo elétrico, os elétrons irão se excitar e essa oscilação coletiva é dita como *plasmon*. Se houver acoplamento entre os fótons do campo externo e os *plasmon*, tem-se *plasmon-polariton* (Braitich, 2015).

A equação de Drude é dada pela equação 2.3, onde γ é o coeficiente de amortecimento, ω é a frequência de excitação (da Silva, 2011).

$$\varepsilon_r(\omega) = \left[1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega} \right] \quad (2.3)$$

A resposta de qualquer material à onda eletromagnética aplicada pode ser caracterizada por dois parâmetros eletromagnéticos, permeabilidade magnética μ e permissividade elétrica ε . Essas duas características físicas são combinadas em um produto para definir quadrado de um índice de refração (Equação 2.4) em que mede a rapidez com que o material transmite luz e como a luz está inclinada a entrar no material - quanto maior o índice, mais lenta a propagação e mais forte a deflexão. De acordo com os valores de ε e μ , os materiais se comportam de maneiras distintas conforme descrito na Figura 2.7 (Tong, 2018).

$$n^2 = \varepsilon_r \mu_r \quad (2.4)$$

Materiais com permissividade e permeabilidade simultaneamente positivas ($\varepsilon > 0$ e $\mu > 0$) são chamados como materiais duplo-positivos (DPS) ou metamateriais destros (RHM). Materiais naturais abundantes como a maioria dos dielétricos se enquadram designação (Tong, 2018).

Materiais com permissividade menor que zero e permeabilidade maior que zero ($\varepsilon < 0$, $\mu > 0$) são chamados de materiais negativos para épsilon (ENG) ou metamateriais elétricos. Em certos regimes de frequência, materiais naturais limitados como muitos plasmas exibem essas características, tais como metais nobres em comprimentos de onda ópticos, materiais ferroelétricos e semicondutores dopados em certas frequências abaixo da frequência de plasma (ω_p) (Tong, 2018).

Materiais com permissividade maior que zero e permeabilidade menor que zero ($\varepsilon > 0$, $\mu < 0$) são chamados de materiais Mu-negativos (MNG) ou metamateriais magnéticos - não ocorre naturalmente em frequências ópticas. Em certos regimes de frequência, alguns sistemas girotrópicos ou materiais de ferrite exibem essa característica. As respostas magnéticas das quais, no entanto, desvanece-se rapidamente acima das frequências de microondas (Tong, 2018).

Materiais com permissividade e permeabilidade menores que zero ($\varepsilon < 0$, $\mu < 0$) são chamados como materiais duplo-negativos (DNG) ou metamateriais canhotos (LHM). Esta classe de materiais só foi demonstrada com construções artificiais. Dentro natureza não existe tal material (Tong, 2018).

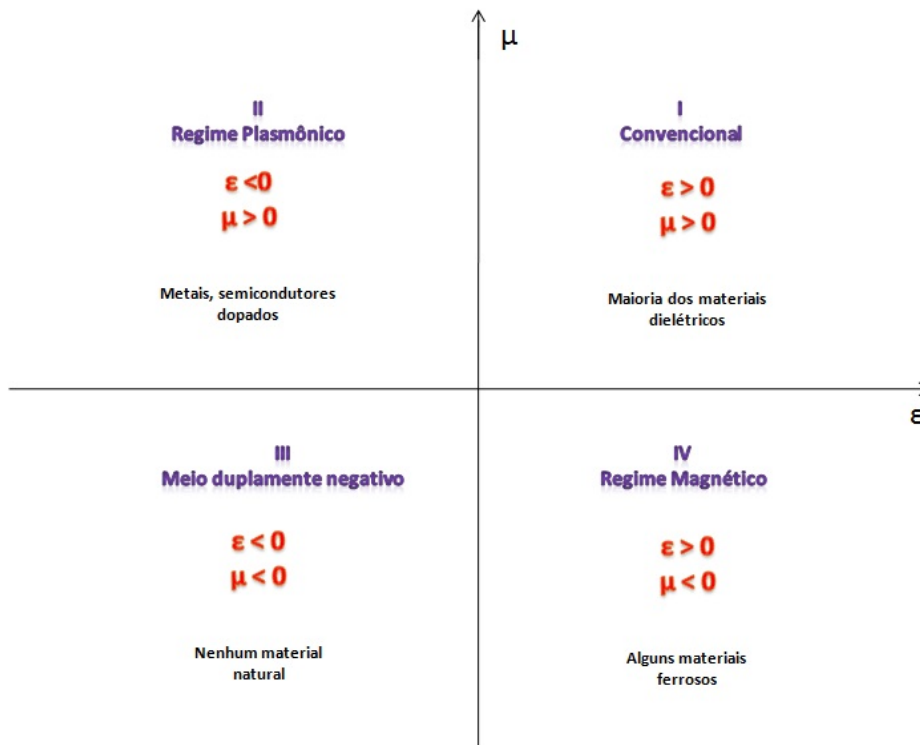


Figura 2.7: Classificação dos materiais pela relação de sinal entre permissividade e permeabilidade (Park, 2015).

Para $\omega > \omega_p$, a permissividade do metal ε_r é positiva. Assim, a luz é propagada através dos elétrons livres no *bulk*, fenômeno conhecido como *Bulk Plasmon Polariton* (BPP). Já se $\omega < \omega_p$, a permissividade é negativa. Dessa forma, a luz é propagada

através de ondas evanescentes, gerando o *Surface Plasmon Polariton* (SPP) (Braitich, 2015).

A propagação se dá através de campo evanescente, que é o campo perpendicular à direção de propagação, refletido na interface e que decai com a distância de forma exponencial (Figura 2.8). No meio dielétrico, o fator de decaimento do campo é dado por δ_d da ordem da metade do comprimento de onda de operação. Já para o metal, o fator δ_m é depende de outros parâmetros (da Silva Junior, 2016).

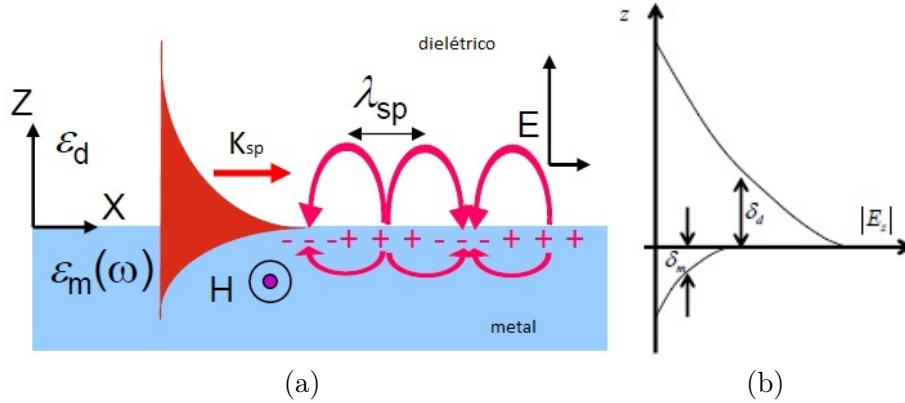


Figura 2.8: (a) Interface metal-dielétrico e perfil do modo SPP. (b) Profundidade de penetração (da Silva, 2011).

A onda superficial se assemelha a luz nos meios dielétricos para baixas frequências e conforme frequência vai aumentando, o comportamento vai tendendo a uma frequência denominada frequência de *plasmon* de superfície.

$$\omega_{SP} < \frac{\omega_p}{\sqrt{1 + \epsilon_2}} \quad (2.5)$$

As ondas SPP são acopladas aos elétrons livres da superfície do metal e dão origem a separações de cargas oscilantes que correspondem aos campos EM. A profundidade de penetração é dada por 2.6 e é limitada a dezenas de nanômetros no metal enquanto que para o dielétrico é maior e altamente dependente do comprimento de onda.

$$\delta_d = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{\epsilon_m + \epsilon_d}{\epsilon_d \epsilon_m}} \quad (2.6)$$

O modo SPP é suportado pelo modo TM. O perfil do campo elétrico, bem como a distribuição de cargas superficiais da propagação SPP na direção do eixo x são mostrados na Figura 2.8 (Alam, 2012).

Uma vez que ϵ_1 e k_0 dependem da frequência, é possível determinar, então, que a equação 2.7 é a relação de dispersão para uma onda superficial entre dois meios (da Silva, 2011).

$$\beta = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}} \quad (2.7)$$

O comportamento da propagação da onda vai depender da frequência: para frequências acima de ω_p , a onda se propaga através do condutor; para frequências entre ω_{SP} e ω_p , a onda não se propaga; e para frequências inferiores a ω_p , a onda fica confinada entre os meios.

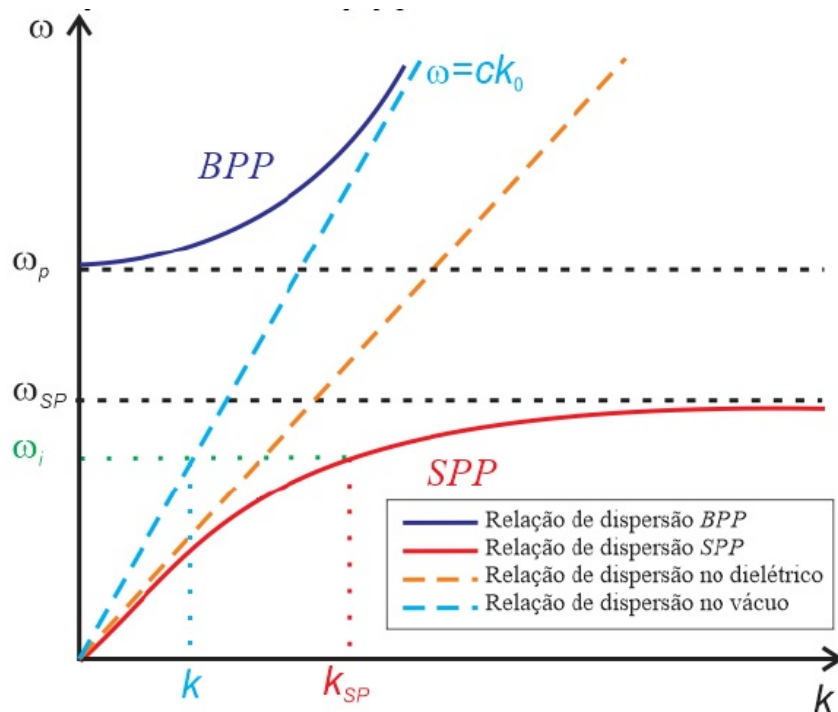


Figura 2.9: Relação de dispersão para luz se propagando em um gás de elétrons livres (Braitich, 2015).

No gráfico da Figura 2.9, a reta azul tracejada representa a dispersão da luz no vácuo ($\omega = ck_0$) e a laranja define a dispersão no dielétrico. Para a frequência ω_i , o vetor de onda k_{SPP} é maior que o vetor de onda k que se propaga no dielétrico.

Metais em geral possuem uma permissividade complexa cuja parte imaginária não pode ser negligenciada. No caso de metais nobres, sob operação em frequências do regime óptico, a parte imaginária é muito maior que a real.

Apesar de limitado, o modelo de Drude é amplamente utilizado devido a facilidade de utilização com métodos numéricos tanto no domínio do tempo quanto da frequência (da Silva, 2011).

2.4 Guias de onda Plasmônicos

Os guias de onda plasmônico são formados por materiais dielétricos e metálicos. As configurações mais comuns são expostas na Figura 2.10. As estruturas multicamadas de guias heterogêneos são em geral classificadas em dois grupos: Isolante – Metal – Isolante (IMI) ou Metal – Isolante – Metal (MIM).

As estruturas IMI são largamente encontradas na literatura e utilizam-se de fitas metálicas de pequena espessura envoltas por um meio dielétrico ou por dois meios dielétricos (um com índice de refração mais baixo e outro mais alto) (Degiron et al., 2008),

(Degiron et al., 2009), (Lee et al., 2009), (Holmgaard et al., 2010), (Du and Chiou, 2014), (Tuniz and Schmidt, 2016), (Liu et al., 2018). Nesse último esquema, a quantidade de campo que penetra na fita metálica e as perdas são reduzidas, entretanto há aumento na distância de propagação. Para essa configuração, há um modo simétrico e um assimétrico. O modo assimétrico exibe aumento do confinamento e penetração no metal com a diminuição da espessura t do metal e conseqüentemente aumento da atenuação. A atenuação diminui a medida que t diminui para o modo simétrico. Assim, para valores de t muito grandes, ambos os modos simétrico e assimétrico são degenerados com SPP de interface única suportadas pelas interfaces metal-dielétrico inferior e dielétrico-metal superior. O modo LR-SPP, conhecido como SPPs de longo alcance, é o modo simétrico de uma estrutura IMI e é essencial para obtenção de dispositivos com comprimentos na grandeza de micrômetros e com seção transversal (Diniz, 2010).

Já as estruturas MIM garantem maior confinamento do campo em dimensões menores que o comprimento de onda da luz, mas apresentam altas perdas (Silva, 2016). Essa configuração é comumente utilizada em guias dentados ou em formato de V (Matsuzaki et al., 2008), (Tao et al., 2009), (Lin and Huang, 2008), anéis ressoadores (Bozhevolnyi et al., 2006), filtros com cavidades ressoantes (Zhang et al., 2009) e filmes metálicos separados por um espaçamento composto de dielétrico (Delacour et al., 2010), (Desiatov et al., 2011), (Choi and Kim, 2012), (Vitrant et al., 2008), (Du and Chiou, 2014), (Dutta et al., 2018), (Gan et al., 2018).

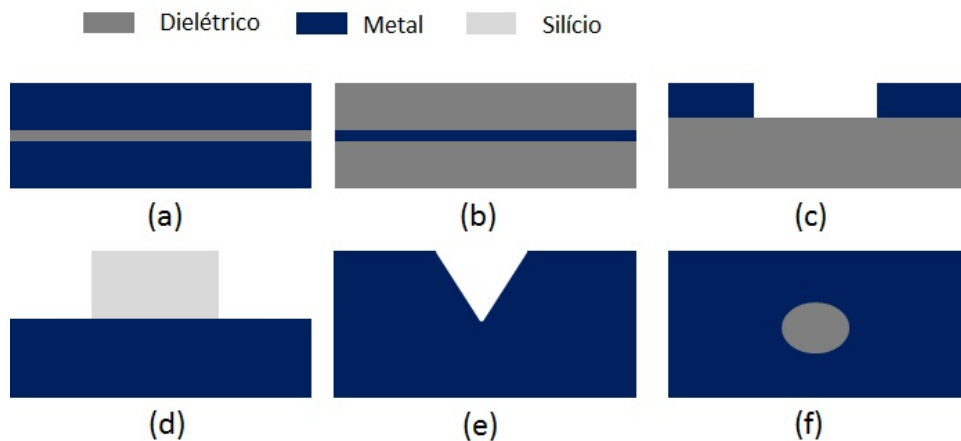


Figura 2.10: Tipos de guias de onda plasmônico: (a) Metal dielétrico metal (MIM) (b) Dielétrico metal dielétrico (IMI) (c) Slot de metal (d) Dielétrico sob metal (e) Canal no metal (f) Nanofuro no metal (Alam, 2012).

Uma solução efetiva o compromisso entre as baixas perdas de propagação e bom confinamento é a adoção das chamadas guias de onda híbridas plasmônicas (*Hybrid Plasmonic Waveguide - HPWG*) que consistem em uma região de alto índice de refração (em geral composto pelo silício) separada por uma superfície metálica (em geral, ouro ou prata) de uma região de baixo índice de refração (em geral, sílica) (vide Figura 2.11 (Alam, 2012)).

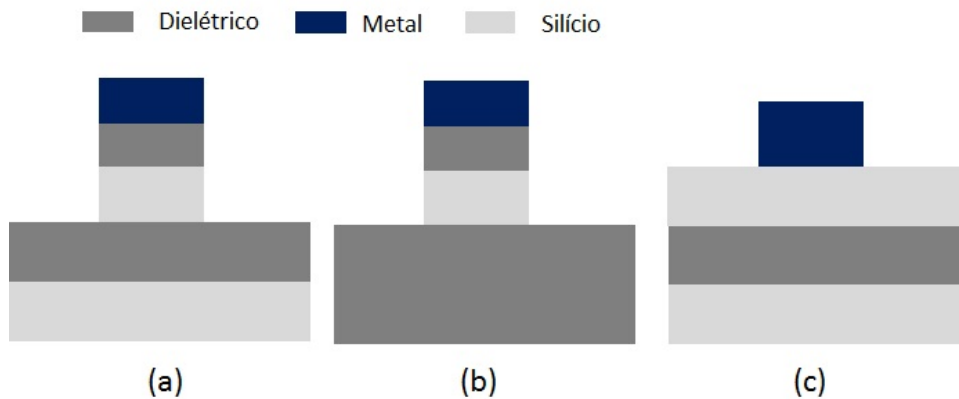


Figura 2.11: Tipos de guias de onda híbrido plasmônico: (a) Esquema composto por filme metálico separado de uma camada de silício por fina camada de dielétrico (SiO_2 em geral) depositados em substrato formado por $SiO_2 + Si$ (b) Esquema composto por filme metálico separado de uma camada de silício por fina camada de dielétrico (SiO_2 em geral) depositados em substrato formado por SiO_2 (c) Esquema composto por filme metálico depositados em substrato formado por $Si + SiO_2 + Si$ (Alam, 2012).

2.5 Estado da Arte

Na literatura, há experimentos envolvendo dispositivos plasmônicos, visto sua capacidade de superação do limite de difração. A fim de otimizar o confinamento da luz e eficiência da transferência do sinal óptico, parâmetros como comprimento de onda de operação, o material dielétrico e metálico utilizado na composição e geometria são alterados nas simulações até que se alcance os valores desejados. Nessa seção, são apresentados alguns trabalhos (vide Figuras 2.12 a 2.20) e a partir deles, uma tabela resumo (Tabela 3.1) foi montada.

Em 2007, Liu et al. (2007b) projetou um dispositivo formado por duas fitas horizontais (largura $W = 2\mu m$), uma de ouro (espessura $T_m = 70nm$) e outra de dielétrico (espessura $T_d = 393nm$ e índice de refração $n = 1,54$), separadas por distância $D = 1,5\mu m$ e cercadas por SiO_2 (vide Figura 2.12a). O comprimento de onda de operação foi $\lambda = 1,55\mu m$ e o comprimento de acoplamento L_c foi inferior a $200\mu m$. A perda de transmissão variou ente 1,3 - 2,3dB para a faixa de $D = 1,5 - 3\mu m$. No estudo seguinte, Liu et al. (2007a) investigou uma estrutura similar consistindo de três fitas (largura $W_m = 2\mu m$), uma de ouro (espessura $T_m = 81nm$) acoplada a duas dielétricas (índice de refração $n_d = 1,54$ e espessura $T_d = 393nm$), distantes uma da outra de $D = 7\mu m$ e envoltas por SiO_2 (vide Figura 2.12b). Esse dispositivo opera como um acoplador de saída tripla com propriedade de divisão de polarização. O comprimento de acoplamento L_c foi $408\mu m$ para $\lambda = 1,55\mu m$ e a perda de acoplamento 1,62dB. Caso se utilizasse apenas 02 braços e a distância entre os mesmos caísse para $D = 2,5\mu m$, os valores do comprimento de acoplamento L_c e da perda de acoplamento seriam $308\mu m$ e 1,82dB, respectivamente.

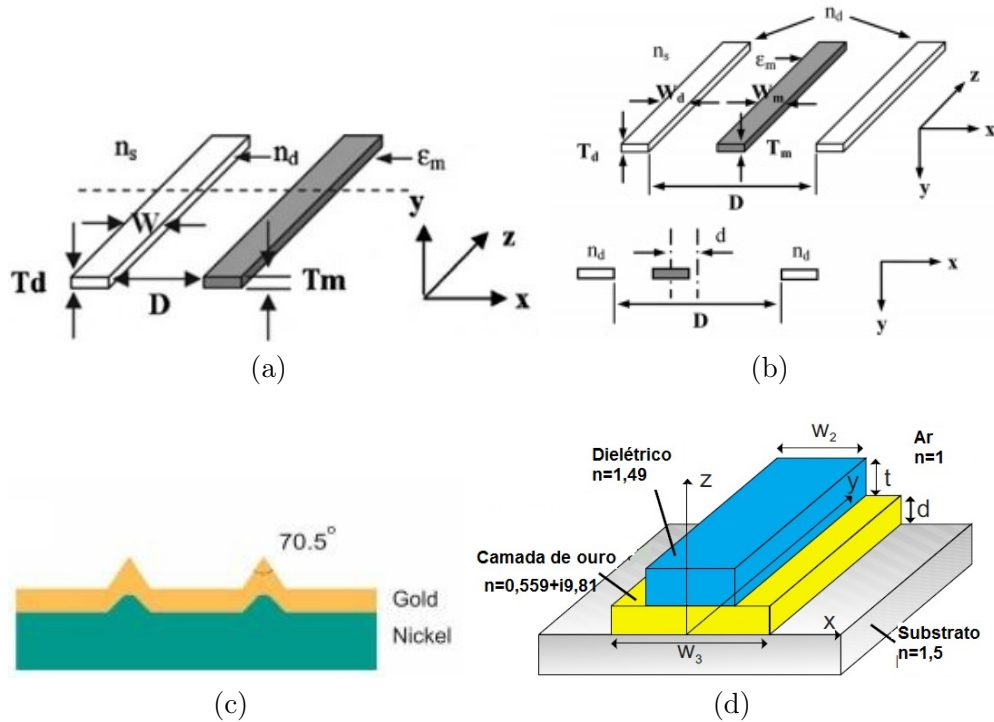


Figura 2.12: Geometrias: (a) Dispositivo formado por 02 fitas horizontais: uma de ouro e outra de dielétrico, cercadas por SiO_2 (Liu et al., 2007b). (b) Dispositivo formado por 03 fitas horizontais: 01 de ouro e 02 de dielétrico, cercadas por SiO_2 (Liu et al., 2007a). (c) Estrutura composta por uma camada de níquel e outra de ouro em forma de V embutido pelo vácuo (Boltasseva et al., 2008). (d) Camada dielétrica de *Poly-Methyl-Methacrylate* (PMMA) depositada sobre película de ouro sob substrato de vidro (Grandidier et al., 2008).

Uma estrutura mostrada na Figura 2.12c e composta por uma camada de níquel (largura $53\mu\text{m}$) e outra de ouro (500nm de largura x $6\mu\text{m}$ de altura) em forma de V (ângulo de $70,5^\circ$) embutido pelo vácuo foi descrita por Boltasseva et al. (2008). Sua fabricação consistiu em 6 etapas onde uma camada de hexametildisilazano é aplicada em um forno de injeção de vapor sobre uma camada de aproximadamente 400nm de substrato de silício e após o cozimento no forno, uma resistência de $1,5\mu\text{m}$ de espessura é padronizada por litografia UV. Logo após, a estrutura é cortada em pedaços de diferentes comprimentos contendo ranhuras em V retas embutidas. A faixa do comprimento de onda de operação foi de $\lambda = [1,43 - 1,52]\mu\text{m}$ e o comprimento de acoplamento $L_c = [1,3 - 120]\mu\text{m}$ respectivamente. O experimento foi executado para polarização Transversal Magnético (TM) e repetido para Transversal Eletromagnético (TE), girando a polarização mantendo a fibra de acoplamento em 90° . Outra alteração foi a do raio de curvatura da camada de ouro em formato de V passando de $r = 10\text{nm}$ para $r = 100\text{nm}$. Conforme esperado, o comprimento da propagação é diretamente proporcional ao aumento do raio de curvatura.

Uma camada dielétrica formada por *Poly-Methyl-Methacrylate* (PMMA) de espessura $t = 330\text{nm}$, largura $w = 240\text{nm}$ e índice de refração $n_w = 1,49$ é depositada sobre uma película de ouro de espessura $d = 50\text{nm}$ cobrindo um substrato de vidro é a estrutura definida por Grandidier et al. (2008) (vide Figura 2.12d). O modo guiado é excitado por uma onda incidente TM na reflexão interna total. O comprimento de

onda de operação foi $\lambda = 780nm$ e a distância de acoplamento L_c foi $6,5\mu m$. O fator de confinamento $R = 69\%$. Foram testados vários parâmetros e concluiu-se que dependendo da espessura da camada dielétrica, a Figura de mérito ou modo de confinamento pode ser otimizada. Para uma camada com espessura fina, os valores altos da Figura de mérito permitem a propagação de modos guiados por *plasmon* de superfície a distâncias na grandeza de vários décimos de micrômetro na região do infravermelho próximo. Para camadas mais espessas, o decaimento é mais curto, mas o confinamento tridimensional é drasticamente aumentado. Este regime de espessura é adequado para aplicações que requerem uma grande densidade de dispositivos plasmônicos.

Verhagen et al. (2008) define seu dispositivo como um guia de onda de ouro ($100nm$) e material dielétrico Al_2O_3 (vide Figura 2.13a). Um substrato de safira de $400\mu m$ de espessura (índice de refração 1,74) é implantado com íons de érbio na camada dielétrica através de uma camada condutora de Ge de $10nm$ de espessura, que posteriormente é removida. Para maximizar a excitação do modo SPP, o feixe de excitação é focado em um ponto a $10\mu m$ da borda triangular do guia. A parte triangular do guia de onda começa a uma distância de $6\mu m$ da borda, possui uma base de largura de $12\mu m$, um comprimento de $60\mu m$, o ângulo da ponta é $11,4^\circ$ e o diâmetro do ápice da ponta cônica é de $65nm$. O comprimento de onda de operação foi $\lambda = 1,48\mu m$ e o comprimento de acoplamento L_c foi $16\mu m$.

O esquema de Lee et al. (2009) possui $6,8cm$ de comprimento e é formado por uma fita de prata ($3,5\mu m$ de largura e $8nm$ de espessura) revestido por um polímero de alto índice de refração ($10\mu m$ de espessura e $n = 1,524$) e unida a duas camadas de um polímero de baixo índice de refração ($20\mu m$ de espessura e $n = 1,514$) (vide Figura 2.13b). As estruturas foram fabricadas em um substrato e depois separadas, formando uma estrutura de fita flexível, podendo ser curvada até $r = 2mm$ e torcida a 90° sem um grande aumento na perda de inserção operando a $\lambda_0 = 1,310\mu m$. Estes resultados mostram que guias de onda LRSPP flexíveis são promissores para aplicações que exigem baixa perda de curvatura e torção.

Uma estrutura constituída de fitas de ouro (espessura $t = 23nm$ e $25nm$ e largura $w = 6,1\mu m$, $6,5\mu m$ e $12\mu m$) em curvas de 90° de raios r variáveis, embebidas em *BenzoCyclobutene-Based* ou BCB e delimitadas por SiO_2 de um lado e ar do outro, foram apresentadas por Degiron et al. (2008). Para um $r < 8mm$, as perdas de inserção para uma fina camada BCB ($b = 6,5\mu m$, $t = 23nm$, $w = 6,1\mu m$) são menores que para uma camada mais grossa ($b = 21\mu m$, $t = 23nm$, $w = 6,5\mu m$), ao passo que para $r > 8mm$, as perdas para uma fina camada são maiores que para uma camada mais grossa (vide Figura 2.13c). Os resultados teóricos calculados usando o FEM (*Finite Element Method*) para duas curvas de raio $r = 7,5mm$ e $1mm$ no caso da camada fina de BCB ($b = 6,5\mu m$, $t = 23nm$, $w = 6,1\mu m$) mostram que a perda de radiação ao longo da parte externa da curva é evidente para $r = 1mm$. O comprimento de onda de operação foi $\lambda = 1,55\mu m$. No seguinte trabalho, Degiron et al. (2009) investigou uma estrutura semelhante. Desta vez, foi inserido um guia dielétrico formado de SU-8 distante $2,5\mu m$ da fita de ouro, ambos embebidos em BCB e delimitados por SiO_2 de um lado e ar, pelo outro (vide Figura 2.13d). O comprimento de onda de operação foi $\lambda = 1,55\mu m$ e a eficiência é de 95% .

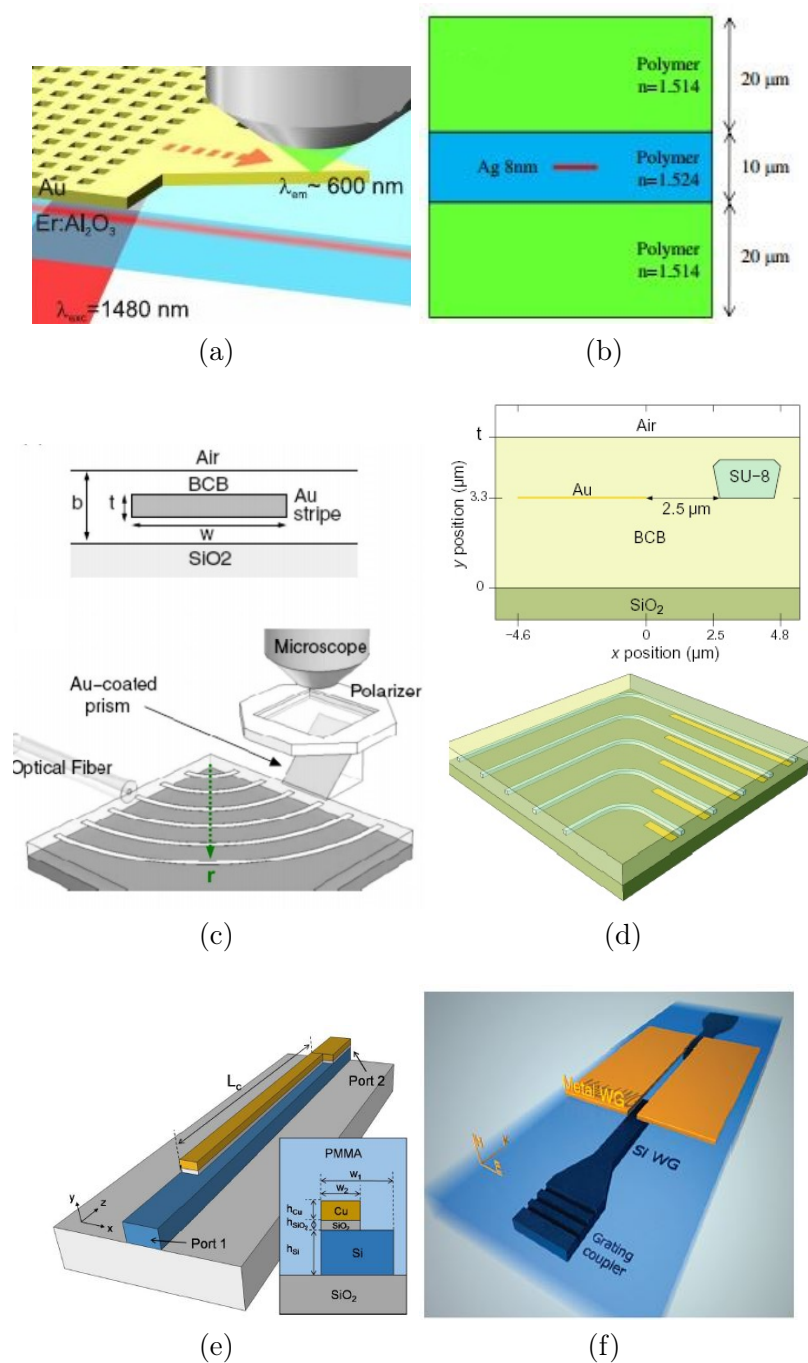


Figura 2.13: Geometrias: (a) Guia de onda de ouro e Al_2O_3 com íons de érbio e substrato de safira (Verhagen et al., 2008). (b) fita de prata unida a 02 camadas de polímero de alto índice de refração e englobadas por um polímero de baixo índice de refração (Lee et al., 2009). (c) fitas de Au curvadas em 90° com raios variáveis, embebidas em BCB, depositadas em substrato de SiO_2 e envoltas por ar (Degiron et al., 2008). (d) fitas de Au e SU-8 curvadas em 90° com raios variáveis, embebidas em BCB, depositadas em substrato de SiO_2 e envoltas por ar (Degiron et al., 2009). (e) Guia de onda híbrido assimétrico formado por uma guia de onda de silício, um guia fino de sílica e uma fita de cobre revestidos por um polímero PMMA (Kim et al., 2009). (f) Duas fitas de Cobre separadas por um slot dielétrico e embebidas em Silica (Delacour et al., 2010)

Um guia de onda híbrido assimétrico mostrado na Figura 2.13e é formado por uma guia de onda de silício ($W_1 = 380nm$ e $h_{Si} = 230nm$), um guia fino de sílica ($W_2 = 180nm$ e $h_{SiO_2} = 50nm$) e uma fita de cobre ($W_2 = 180nm$ e $h_{Cu} = 100nm$) revestidos por um polímero PMMA ($n = 1,481$) operando a um comprimento de onda $\lambda_0 = 1,55\mu m$ foi estudado por Kim et al. (2009). O comprimento de acoplamento para esses parâmetros foi de $L_c = 4\mu m$. No mesmo trabalho houve alteração na geometria (o guia metálico e o do óxido de silício sofreram um chanfro formando uma estrutura pontuda) e no metal utilizado (cobre - $W_2 = 380nm$, prata - $W_2 = 375nm$, ouro - $W_2 = 380nm$ e alumínio - $W_2 = 355nm$) resultando comparativamente ao modelo anterior em comprimento de acoplamento um pouco maior ($L_c = 4,5\mu m$) e melhores resultados usando a prata, respectivamente.

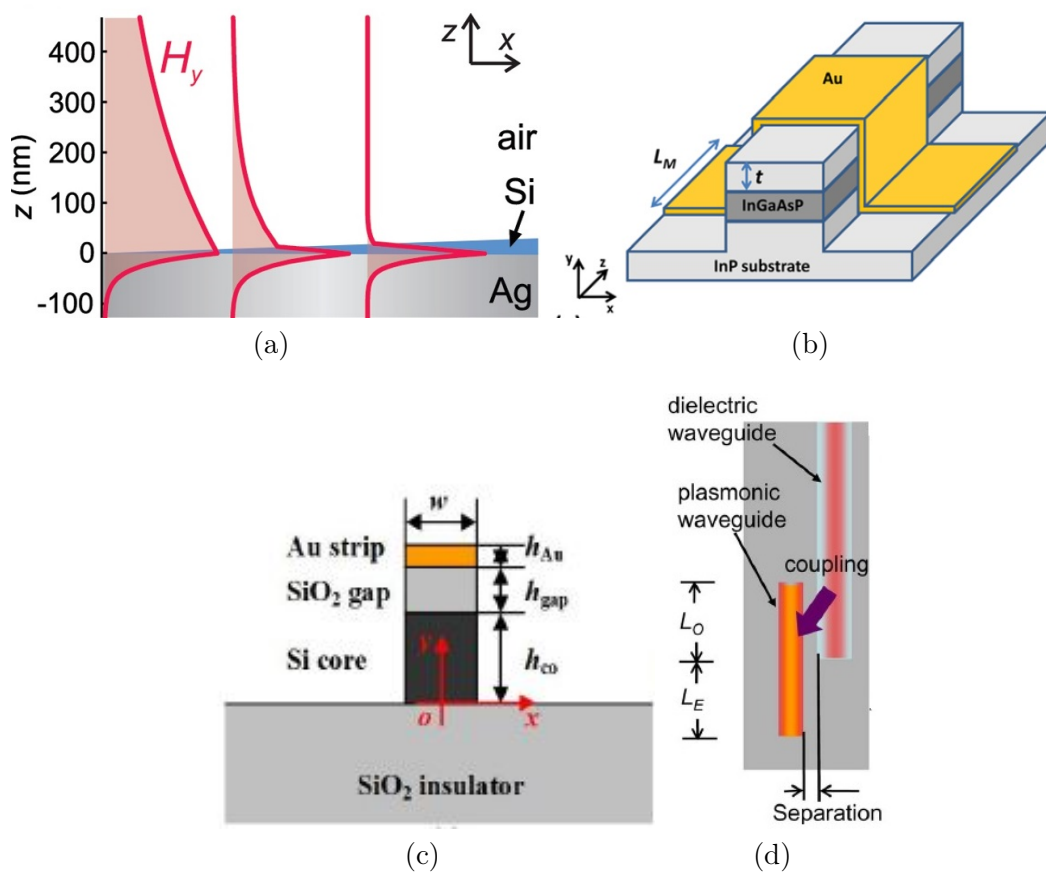


Figura 2.14: Geometrias: (a) Cunha dielétrica de silício depositada em um substrato de prata envoltos em ar (Verhagen et al., 2010). (b) Acoplador com substrato de InP, seguido de uma camada de InGaAsP e uma de ouro (Summers and Ram, 2011). (c) Guia de onda de isolador-em-silício (SOI - Silicon-on-Insulator) com núcleo de silício, uma fina camada de dióxido de silício, uma fita de ouro com uma nanoponta (He et al., 2011). (d) Guia de onda dielétrico e outro plasmônico (elétrons evaporados de ouro) embebidos em SiO_2 (Kong et al., 2011).

Delacour et al. (2010) propõe um esquema composto por duas fitas de cobre (distantes uma da outra por $6\mu m$) separadas por um slot dielétrico (com largura de $30nm$) sobrepostos das fitas por $9\mu m$ e embebidas em sílica (vide Figura 2.13f). Para $\lambda = 1,55\mu m$, a eficiência de acoplamento é $\eta = 75\%$ e o comprimento de acoplamento é reduzido para $L_c = 1\mu m$.

A estrutura de [Verhagen et al. \(2010\)](#) consiste em uma cunha dielétrica de silício (índice de refração $n = 3,85$) cuja espessura aumenta ao longo do eixo x (varia de 0 a 20nm da esquerda para a direita) e está depositada em um substrato de 100nm de prata envoltos em ar (vide Figura 2.14a). Alterando o ângulo de abertura para $0,72^\circ$, $1,43^\circ$ e $2,87^\circ$. O aprimoramento de campo na cunha é máximo na interface Ag/Si, mas ainda é significativo na superfície Si/ar. O comprimento de onda utilizados foram de 628nm e 577nm, a eficiência de acoplamento é $\eta = 70\%$ e o comprimento de propagação foi cerca de 200nm.

[Summers and Ram \(2011\)](#) estuda um esquema de um acoplador de $30\mu m$ de comprimento formado por um substrato de InP, seguido de uma camada de InGaAsP (espessura 610nm), de outra camada de InP (espessura $t = 280nm$) e uma de ouro (espessura maior que 60nm) com largura de L_m (vide Figura 2.14b). O comprimento de onda utilizado foi de $1,55\mu m$ e o comprimento de propagação foi cerca de $7\mu m$.

O projeto de [He et al. \(2011\)](#) é composto de uma guia de onda de isolador-em-silício (SOI - *Silicon-on-Insulator*) com núcleo de silício, uma fina camada de dióxido de silício e uma fita de ouro (vide Figura 2.14c). As ondas guias no SOI são acopladas no metal e logo após, toda a estrutura é acoplada para concentrar o SPP a uma região de sub-comprimento de onda onde se alcança uma intensidade de campo elétrico 50 vezes maior se comparado ao atingido utilizando-se apenas o SOI. As medidas do núcleo de silício são 300nm de espessura x 200nm de largura e da nanoponta, largura 20nm x comprimento $1\mu m$ x altura 7nm. Pelos experimentos realizados, verificou-se que ao diminuir a largura do núcleo, o índice de refração efetivo também diminui e acarreta aumento na altura da nanoponta. Outra constatação foi que pequenas espessuras da fita de ouro ocasionam alta perda ôhmica. O comprimento do dispositivo é $2,2\mu m$ para $\lambda = 1,55\mu m$ e a eficiência de acoplamento ficou em $\eta = 50\%$.

Um dispositivo mostrado na Figura 2.14d e formado por um guia de onda dielétrico e outro plasmônico (elétrons evaporados de ouro) envolvidos em SiO_2 é estudado por [Kong et al. \(2011\)](#) A eficiência de acoplamento aumenta para $\eta = 66\%$, mas o comprimento de acoplamento também cresce para $L_c = 5\mu m$ para $\lambda = 828nm$.

Ainda em 2011, [Desiatov et al. \(2011\)](#) propõe uma ponta de silicone (450nm de largura x $2\mu m$ de comprimento x 250nm de altura e 10nm de diâmetro da ápice) acoplada a uma guia de onda de dióxido de silício (900nm de largura x 250nm de altura) separadas por 15nm de ar (vide Figura 2.15a). O campo eletromagnético primeiro se propaga no guia de onda dielétrico, é acoplado na ponta MDM (metal-dielétrico-metal) e então é concentrado no ápice da ponta. Quando a ponta é alterada para ouro, o campo no ápice é cerca de 10 vezes maior. A eficiência de acoplamento foi $\eta = 75\%$ e o comprimento de acoplamento $L_c = 2\mu m$ para $\lambda = 1,55\mu m$.

[Liu et al. \(2011\)](#) projetou novamente um dispositivo formado por fitas horizontais de ouro ($W_m = 8\mu m$ e $T_m = 12\mu m$) e de dielétrico SiN (W_d, T_d e $n_d = 1,871$) separadas por distância $D = 11\mu m$ e cercadas por SiO_2 ($n_b = 1,453$ com $2\mu m$ de espessura) conforme mostrado Figura 2.15b. Mas nesse novo artigo, há camadas de SiO_2 com distintos índices de refração acima ($n_{sup} = 1,448$ - PECVD com $9\mu m$ de espessura) e abaixo ($n_{sub} = 1,446$ - substrato com $15\mu m$ de espessura) das tiras. O comprimento de onda de operação foi $\lambda = 1,55\mu m$. Os parâmetros W_d e T_d são alteradas a fim de minimizar a perda e o comprimento de acoplamento L_c . Assim, o valor otimizado foi $W_d = 5\mu m$ e $T_d = 32nm$ gerando uma distância de acoplamento de $L_c = 1,7mm$ e eficiência superior a 99%.

A eficiência de acoplamento $\eta = 90\%$ foi atingida para o esquema idealizado por [Choi and Kim \(2012\)](#) (vide Figura 2.15c). Nele, um dispositivo vertical formado por guia de onda isolado de Si, um guia de onda híbrido plasmônico ($Al - SiO_2 - Si - SiO_2 - Al$) separados por uma distância $D = 150nm$. A distância de acoplamento do dispositivo é $2,6\mu m$ para $\lambda = 1,55\mu m$.

O dispositivo de [Fevrier et al. \(2012\)](#) é formado por um guia de onda de silício ($220nm \times 500nm$), uma fina camada de $1nm$ feita de titânio e uma cadeia de nanopartículas de ouro ($30nm$) depositada por evaporação por feixe de elétrons (vide Figura 2.15d). Vinte cadeias de ouro cujo formato é elíptico ($200nm \times 75nm$) formam 06 Nanopartículas metálicas (MNP) que acompanham o eixo de simetria do guia de onda de silício e distam umas das outras de $150nm$. Esse esquema apresentou eficiência de acoplamento de 90% e distância de acoplamento do dispositivo é $2,6\mu m$ para $\lambda = 1,4\mu m$.

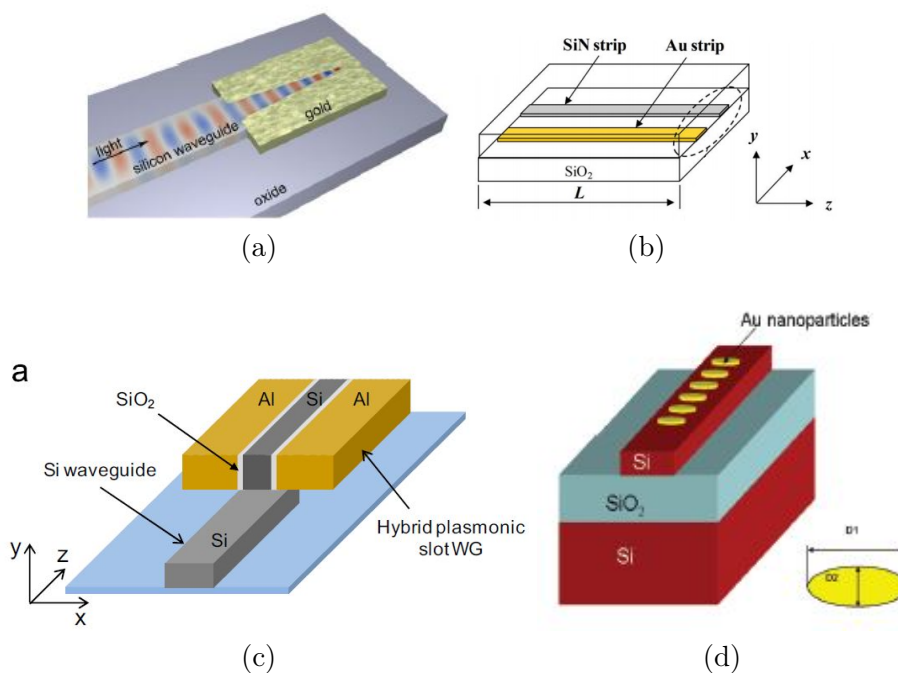


Figura 2.15: Geometrias: (a) Ponta de silício acoplada a uma guia de onda de dióxido de silício. ([Desiatov et al., 2011](#)) (b) fitas de Au e SiN separadas por distancia D cercadas por camadas de SiO_2 com distintos índices de refração. ([Liu et al., 2011](#)) (c) Dispositivo vertical formado por guia de onda isolado de Si e um guia de onda híbrido plasmônico $Al-SiO_2-Si-SiO_2-Al$. ([Choi and Kim, 2012](#)) (d) Guia de onda de Si, uma fina camada de Ti e uma cadeia de nanopartículas de ouro ([Fevrier et al., 2012](#)).

[Chen et al. \(2012\)](#) propõe um acoplador direcional composto de 02 braços separados de $d = 3\mu m$. Um dos braços é composto de um guia de onda dielétrico $SiO_2-Si-SiO_2$ (dimensões $H_t = 929nm$, $h_d = 372nm$ e $H_d = 929nm$ respectivamente) com largura de $W_1 = 400nm$ (vide Figura 2.16a). O outro braço é composto de um guia de onda híbrido $SiO_2 - Si - SiO_2 - Ag - SiO_2 - Si - SiO_2$ (dimensões $H_g = 800nm$, $h_{Si} = 295nm$, $h_{SiO_2} = 10nm$, $h_m = 10nm$, $h_{SiO_2} = 10nm$, $h_{Si} = 295nm$, $H_g = 800nm$ respectivamente) com largura de $W = 300nm$. Para $\lambda = 1,55\mu m$, distância de acoplamento foi de $29,4\mu m$ quando $d = 300nm$, $11,4\mu m$ quando $d = 200nm$ e $185\mu m$ quando $d = 500nm$. A eficiência de acoplamento foi de $\eta = 97,4\%$ quando $d = 300nm$, $\eta = 99\%$ quando $d = 200nm$ e $\eta = 82,8\%$ quando $d = 500nm$.

A propagação de SPPs guiada ao longo do nanofio de ouro envolvido pelo vidro de sílica é estudada por [Marini et al. \(2013\)](#). A geometria é cilíndrica, comprimento de propagação igual a $L = 100 \mu\text{m}$ e raio variando de 50 a 500nm. Os comprimentos de onda utilizados foram $\lambda = [700-900]\text{nm}$ (vide Figura 2.16b). O campo eletromagnético está fortemente ligado à superfície metálica e a distribuição de energia é cilíndricamente simétrica.

A estrutura de [Lindquist et al. \(2013\)](#) é uma pirâmide tridimensional com ponta nanofocalizadora plasmônica em forma de C fabricada através de moldagem de molduras e fresagem (vide Figura 2.16c). A assimetria da forma C permite a iluminação interna com incidência normal, luz polarizada linearmente, com entrega eficiente da energia óptica para uma ponta piramidal afiada (com 10nm de raio).

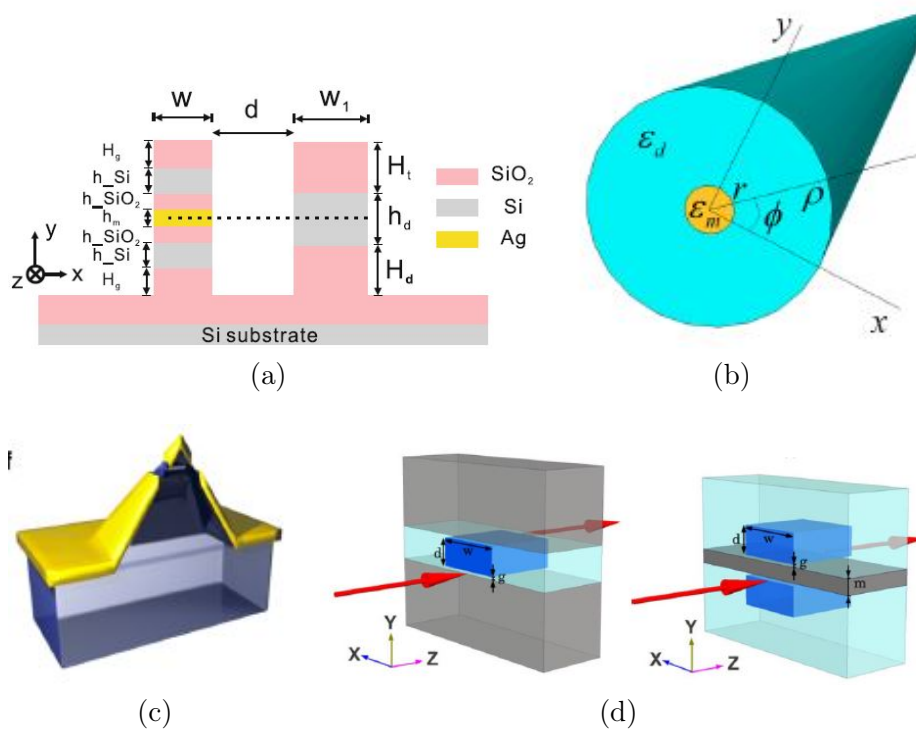


Figura 2.16: Geometrias: (a) Acoplador composto de guia de onda $\text{SiO}_2\text{-Si-SiO}_2$ e guia de onda $\text{SiO}_2\text{-Si-SiO}_2\text{-Ag-SiO}_2\text{-Si-SiO}_2$ ([Chen et al., 2012](#)). (b) SPPs guiada ao longo do nanofio de ouro envolvido pelo vidro de sílica ([Marini et al., 2013](#)). (c) Pirâmide tridimensional com ponta nanofocalizadora plasmônica em forma de C ([Lindquist et al., 2013](#)). (d) Acoplador direcional plasmômico híbrido vertical MIM e IMI ([Du and Chiou, 2014](#)).

[Du and Chiou \(2014\)](#) propôs e analisou acopladores direcionais verticais IMI e MIM formados por camada de metal (prata) e camada de um dielétrico de alta permissividade (silício) de dimensões $w \times d$ envolvido por outro dielétrico de baixo índice de refração (sílica) separadas por uma distância g (vide Figura 2.16d). A configuração MIM apresentou uma melhor performance no acoplamento, bem como comprimento de acoplamento abaixo de $0,5\mu\text{m}$ e baixa perda ($<5\%$). O comprimento de onda foi de $\lambda = 1,55\mu\text{m}$.

O modelo de [Dai et al. \(2014\)](#) consiste em 02 braços: um guia de onda dielétrico reto com largura W_2 formado por uma camada de silício de altura h_{Si} e uma camada

de sílica de altura h_{SiO_2} e outro guia de onda híbrido curvo ($R = 1,3\mu m$) híbrido com largura W_1 formado por uma camada de silício de altura h_{Si} , uma camada de sílica de altura h_{SiO_2} e uma camada de metal de altura h_m , separados por $W_{gap} = 200nm$ (vide Figura 2.17a). Toda essa estrutura está depositada em um substrato de silício e opera como um divisor de polarização cuja entrada do sinal é no guia curvo: a polarização TE é acoplada e sai pelo guia reto enquanto a TM continua no guia curvo. O comprimento de acoplamento fica em $L_c = 2,2\mu m$. Foi simulada uma estrutura com W_{gap} nula, ($R = 1,2\mu m$) e $W_1 + W_2 = 8\mu m$ e o comprimento de acoplamento ficou em $L_c = 1,1\mu m$.

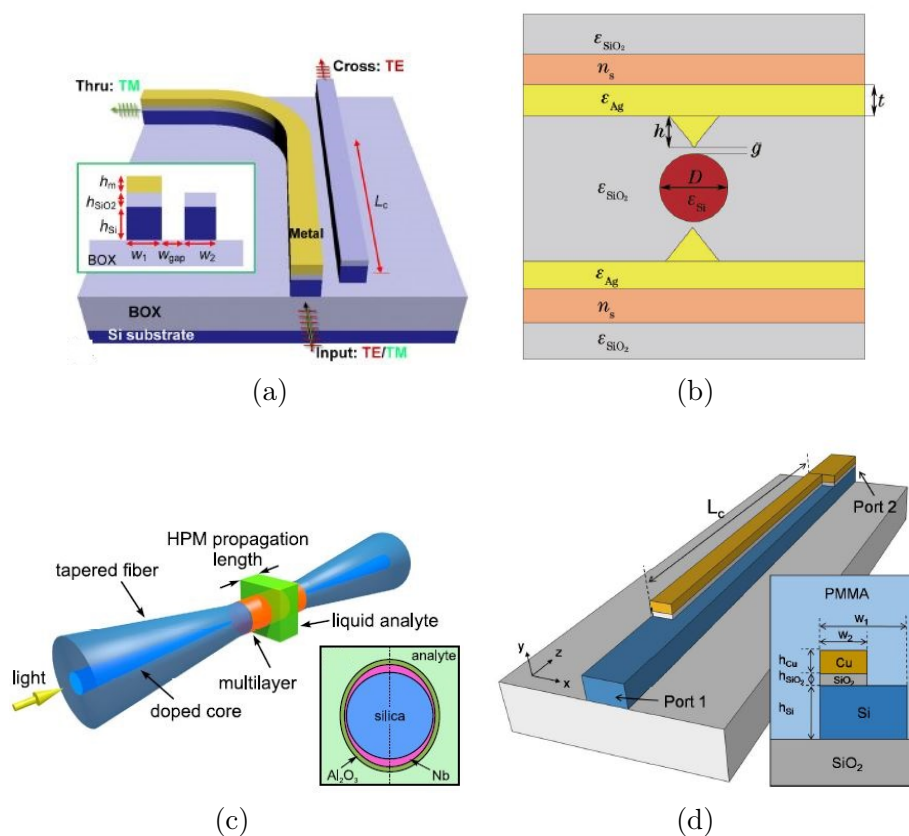


Figura 2.17: Geometrias: (a) Um guia de onda direto dielétrico e outro curvo híbrido (Dai et al., 2014). (b) Guia de ondas híbrido SiO_2 -Si-Ag- SiO_2 -Ag-Si- SiO_2 , um nanofio e um triângulo de prata (Hai et al., 2015). (c) Bastão cilíndrico de vidro de SiO_2 fundido, rodeado por duas camadas de nióbio, coberto com Al_2O_3 e embutido num líquido com um índice de refração predefinido (Wieduwilt et al., 2015). (d) Guia de onda de fita de silício espaçador de óxido fino e tampa metálica feita de cobre, ouro, prata ou alumínio (Kim and Qi, 2015).

A topologia descrita por [Hai et al. \(2015\)](#) consiste em um guia de ondas híbrido composto de 7 camadas (SiO_2 -Si-Ag- SiO_2 -Ag-Si- SiO_2) e um nanofio de diâmetro $D=100\text{nm}$ cruzando a camada central de sílica e distante $g=20\text{nm}$ do triângulo de prata (vide Figura 2.17b). Esse triângulo de prata tem ângulo da ponta $\theta = 90^\circ$ altura $h=50\text{nm}$ e está sob as 02 camadas de prata (espessura $t=100\text{nm}$). O comprimento de onda foi de $\lambda = 1,55\mu\text{m}$ e o comprimento de acoplamento fica em $59,96\mu\text{m}$.

De acordo com [Wieduwilt et al. \(2015\)](#), além do uso de metais nobres como ouro e prata, que possuem baixa perda óptica no espectro visível, a utilização de nióbio é uma grande possibilidade, pois revela melhores propriedades no que tange a aspectos de continuidade do filme, estabilidade mecânica e resistividade química. O esquema estudado envolve um bastão cilíndrico de vidro de sílica fundido ($20\ \mu\text{m}$ de diâmetro), rodeado por duas camadas de nióbio (espessura de $12,5\ \text{nm}$), coberto com Al_2O_3 ($80\ \text{nm}$ de espessura) e embutido num líquido com um índice de refração predefinido ($n = 1,38$) (vide Figura 2.17c). O comprimento de onda de operação é 730nm . Com a utilização de nióbio, se observou uma melhor aderência a sílica quando comparado ao filme de ouro.

[Kim and Qi \(2015\)](#) propõe um guia de onda plasmônico híbrido assimétrico constituído por uma guia de onda de silício, uma fina camada de óxido de silício e uma fita metálica feita de cobre, ouro, prata ou alumínio envoltos em PMMA (vide Figura 2.17d). São apresentadas duas implementações, uma com e uma sem o afinilamento da fita metálica, e diferentes formas de cone (linear e exponencial) também são analisadas. O comprimento do dispositivo ficou $L < 5\mu\text{m}$ e eficiência de acoplamento foi de $\eta = 78\%$

Já o esquema de [Luo et al. \(2015\)](#) consiste em um triângulo isósceles de ouro (300nm de base x 750nm de comprimento) colocado em cima de um guia de onda de silício ($500\ \text{nm}$ x $220\ \text{nm}$) com uma camada de pequena espessura de SiO_2 para separar o filme de ouro do guia de onda ($20\ \text{nm}$ de largura) (vide Figura 2.18a).

[Smith et al. \(2015\)](#) seleciona uma estrutura com ranhura cônica com comprimento de $5\mu\text{m}$ (um perfil em forma de V introduzido em uma superfície plana metálica cujo raio da ponta é 5nm) composto por ouro, sílica (espessura de $t=20\text{nm}$) e silício, rodeados de ar (vide Figura 2.18b). Nas simulações, foi utilizada uma faixa de angulação da cunha de $\theta=[5^\circ-35^\circ]$ variando a cada 5° .

O dispositivo estudado por [Tuniz et al. \(2016\)](#) é composto por duas seções. A primeira é formada por uma fibra de índice degrau de sílica com núcleo de óxido de germânio GeO_2 (raio de $2\mu\text{m}$) e um canal nano central (raio de 550nm e comprimento de 2mm) (vide Figura 2.18c). Na segunda seção, um guia de onda de ouro é incluído no canal nano central. A eficiência de acoplamento foi de $\eta = 37\%$ para $\lambda = 650\text{nm}$.

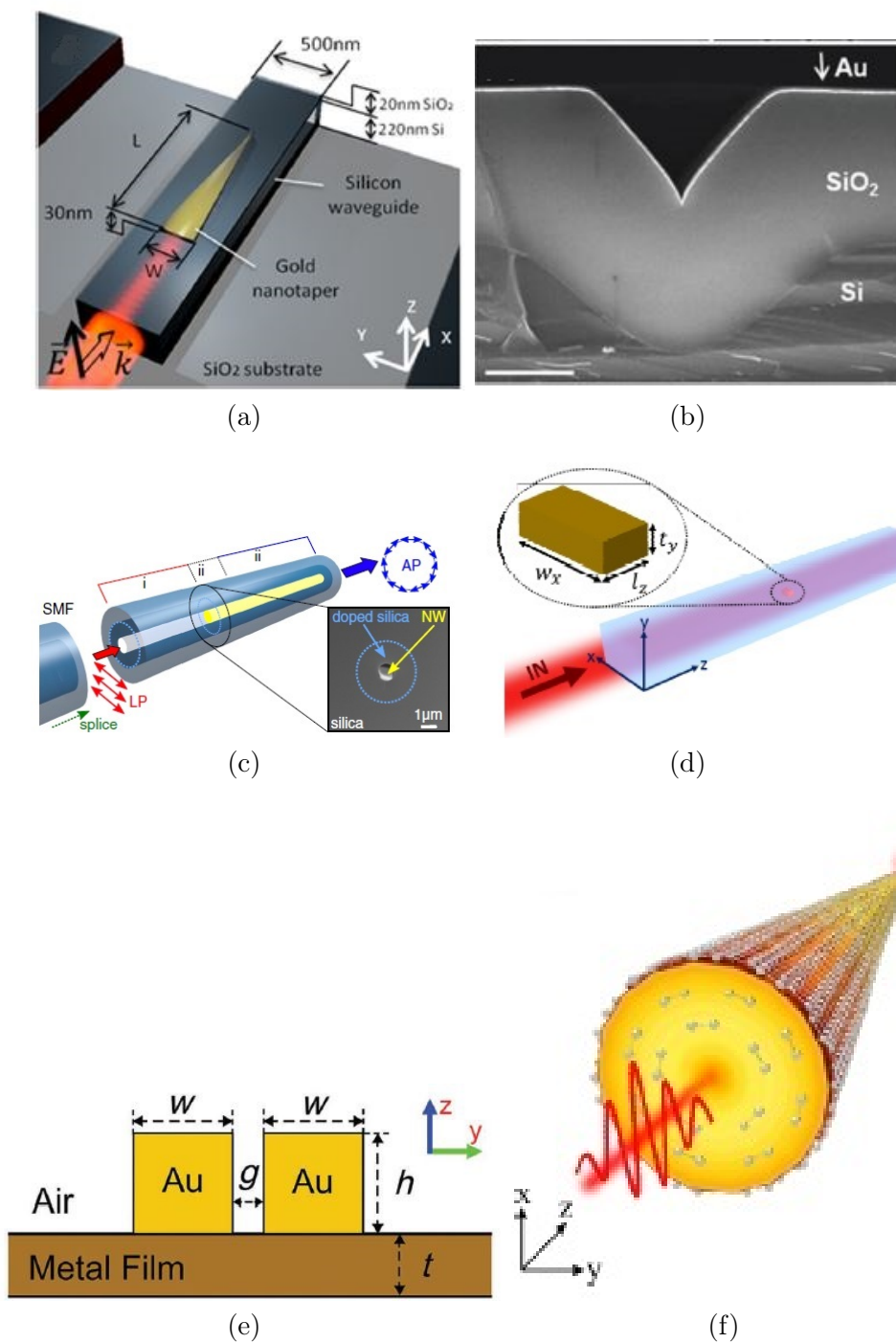


Figura 2.18: Geometrias: (a) Triângulo isósceles de ouro em cima de guia de onda de silício com uma camada de pequena espessura de SiO_2 (Luo et al., 2015). (b) Ranhura cônica em forma de V introduzido em uma superfície de ouro, sílica e silício e rodeado de ar (Smith et al., 2015). (c) Uma fibra de índice degrau de sílica com núcleo de óxido de germânio em um guia de onda de ouro (Tuniz et al., 2016). (d) Nanopartícula de ouro inserida em núcleo de silício e envolvido pelo ar (Tellez-Limon et al., 2016). (e) Dois guias de onda metálicos separados e envoltos por ar e depositados em um filme metálico (Gan et al., 2017). (f) Guia de ondas de grafeno cônico com N multicamadas (Liu et al., 2016).

O trabalho de [Tellez-Limon et al. \(2016\)](#) projeta uma nanopartícula de ouro ($100\mu\text{m}$ de largura x $50\mu\text{m}$ de comprimento x 30nm de altura) inserida em um núcleo de silício (500nm de largura x 1200m de comprimento x 450nm de altura) com índice de refração igual a $n = 2$ e envolvido por ar (vide Figura 2.18d). Os resultados numéricos foram obtidos utilizando a técnica de integração finita. A eficiência de acoplamento foi de $\eta = 82\%$ para $\lambda = 1,048\mu\text{m}$. Ainda foram feitas simulações com deslocamentos verticais (s_y) e laterais (s_x) da nanopartícula medida a partir do centro do núcleo correspondentes a $s_y = 0, 40, 70$ e 85 nm e $s_x = 0, 100, 180, 200$ nm, respectivamente. Em ambas as mudanças verticais e horizontais, a interação deste modo com a nanopartícula é menos sensível aos deslocamentos ao longo da direção y , devido à distribuição espacial do modo TE_0 .

[Gan et al. \(2017\)](#) estuda em seu artigo um esquema composto por 02 guias de onda metálicos (formados por ouro com as dimensões $w = 300\text{nm}$ e $h = 300\text{nm}$) separados pela distância $g = 100\text{nm}$ envoltos por ar e depositados em um filme metálico com espessura t . (vide Figura 2.18e) O comprimento de onda de operação é $\lambda = 830\text{nm}$

A nanofocalização plasmônica de ondas THz em grafeno cônico multicamadas foi estudada no trabalho de [Liu et al. \(2016\)](#). O modelo teórico considerado para descrever a propagação de SPPs foi um guia de ondas de grafeno cônico (raio $R_a = 1\mu\text{m}$ de entrada e raio $R_b = 5\text{nm}$ de saída ($R_{b1} = 4\text{nm}$) com comprimento $L=3\mu\text{m}$ em cada uma das N multicamadas (vide Figura 2.18f). O raio da ponta é 5nm . De acordo com os resultados calculados, verifica-se que o confinamento de campo pode ser amplamente aumentado na ponta cônica e a amplitude da onda THz pode ser aumentada por um fator de 620 a $\lambda = 50\mu\text{m}$.

Um outro trabalho de [Tuniz and Schmidt \(2016\)](#) define um modelo de acoplador plasmônico formado por um guia de onda formado por uma casca de sílica, um núcleo (500 nm de diâmetro) de um material dielétrico com índice de refração pré-definido ($n = 1,87$) e um nanofio de metal (15nm de espessura) que dista $t = 400$ nm do núcleo e possui uma nanoponta focalizadora de luz tanto para coleta quanto para entrega (vide Figura 2.19a). A eficiência de acoplamento foi de $\eta = 80\%$ para $\lambda = 1,55\mu\text{m}$ e o comprimento de acoplamento é reduzido para $L_c = 5,3\mu\text{m}$.

O dispositivo de [Großa et al. \(2016\)](#) consiste em um filme de ouro com espessura de 30nm depositado em uma camada de vidro. A ponta tem formato de cone com abertura angular de 45° e raio 12nm (vide Figura 2.19b). O comprimento de onda utilizado é 815nm e a distância de acoplamento $L_c = 50\mu\text{m}$

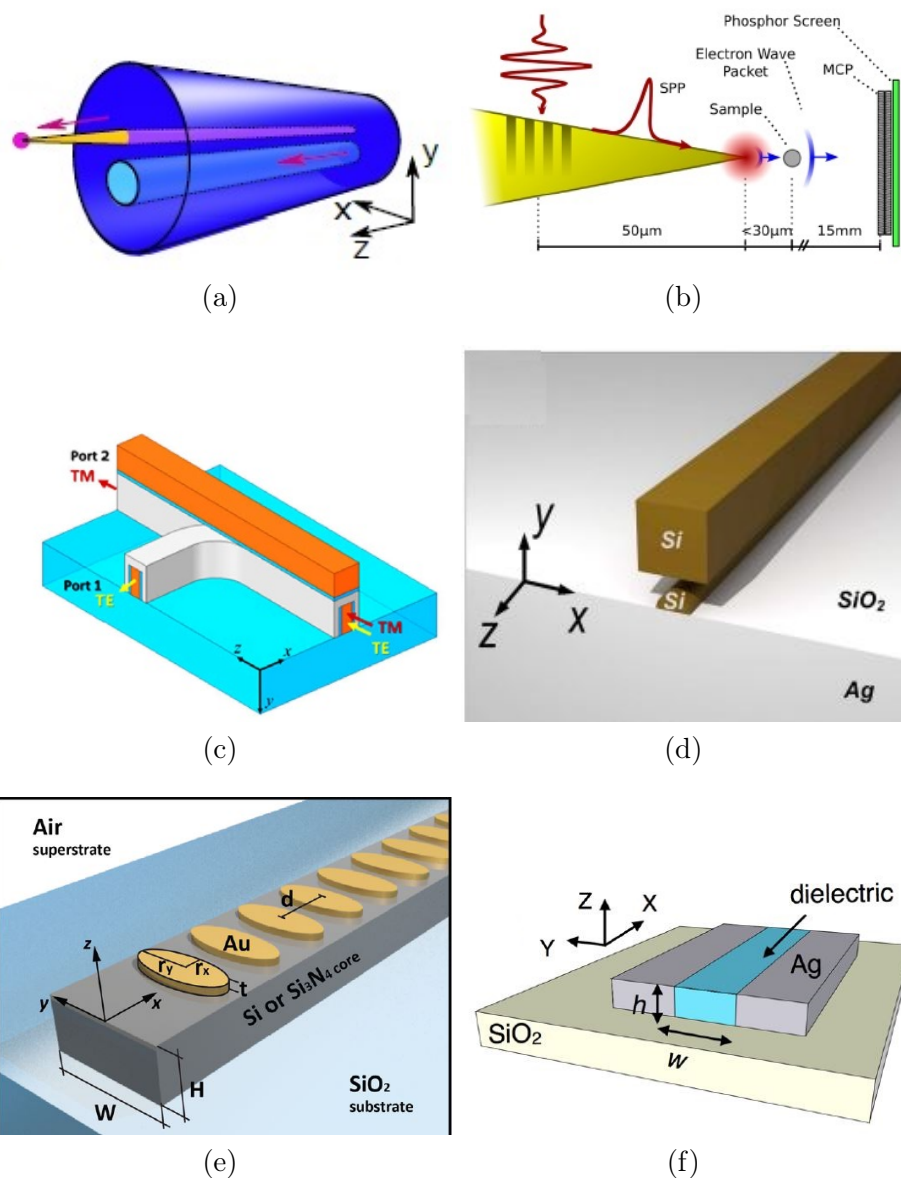


Figura 2.19: Geometrias: (a) Acoplador plasmônico formado por fibra óptica com casca de sílica, núcleo de material dielétrico com índice de refração pré-definido e nanofio de ouro com nanoponta focalizadora (Tuniz and Schmidt, 2016). (b) Um filme de ouro depositado em uma camada de vidro formando uma nanoponta focalizadora (Großa et al., 2016). (c) Um guia inferior curvado e outro superior reto (Chang and Huang, 2016). (d) Nano esfera de silício apoiada em substrato prata, separados por $g = 5nm$ e preenchido com SiO_2 de guia retangular silício (Zhang et al., 2017). (e) Cadeias de nanopartículas metálica (MNP - *Metallic Nanoparticle Chains*) elíptica de prata depositadas sobre guia de onda dielétrico (Si ou Si_3N_4) com substrato de SiO_2 (Magno et al., 2017). (f) Estrutura formada por camada de SiO_2 e camada MIM (Ag-dielétrico-Ag) (Dutta et al., 2018).

O guia de onda híbrido plasmônico de Chang and Huang (2016) possui duas partes envoltas em ar. A primeira é formada um guia inferior curvado (raio de curvatura $R=800nm$) com altura de $h_1 = 200nm$ depositado em uma plataforma SOI e formado por um núcleo de silício (largura $w_1 = 80nm$) intercalado entre duas camadas de dióxido de silício (largura $w_2 = 5nm$) e prata (largura $w = 150nm$). A segunda é um guia

superior reto com largura $w_3 = 240nm$ formado por uma camada nanométrica de SiO_2 ($h_3 = 5nm$) intercalada entre as camadas Si ($h_4 = 200nm$) e Ag ($h_2 = 50nm$) (vide Figura 2.19c). A eficiência de acoplamento foi de aproximadamente $\eta = 95\%$ para $\lambda = 1,55\mu m$.

Zhang et al. (2017) estudou um dispositivo formado por uma nano esfera ($r = 20nm$) de silício apoiada em um substrato de prata e separados por uma distância $g = 5nm$ e preenchido com sílica de um guia de onda retangular ($w = 200nm$ e $h = 200nm$) feito de silício (vide Figura 2.19d). Quando se alterava o valor do raio da nano esfera, percebeu-se que para valores menores que $20nm$, o acoplamento entre os guias de silício e prata eram mais fortes. Em um segundo momento, a estrutura é alterada para dois novos modelos: um MIM (a estrutura inicial é espelhada tomando como referência o meio do guia de silício) e um IMI (a estrutura inicial é espelhada tomando como referência o meio do substrato de prata). A estrutura MIM apresenta um ultra confinamento do campo enquanto a estrutura IMI apresenta baixa perda de propagação.

Cadeias de nanopartículas metálicas ou MNP (*Metallic Nanoparticle Chains*) com formato elíptico ($r_y = 100nm$, $r_x = 42,5nm$ e espessura $t = 30nm$), feitas de ouro e separadas de $d = 15nm$ são depositadas sobre um guia de onda dielétrico (Si ou SIN_4) com dimensões $W = 500nm$ e $H = 220nm$ e substrato de SiO_2 são tratado no trabalho de Magno et al. (2017). Essa estrutura mostrada na Figura 2.19e, suporta os modos de *plasmon* de superfície localizada (LSP), podendo confinar a luz em escalas ainda menores do que os SPP. O comprimento de onda utilizado é $\lambda = 1,450\mu m$ e a eficiência de acoplamento é $\eta = 74,5\%$ usando Si .

A pesquisa de Dutta et al. (2018) retrata uma estrutura formada de uma camada de SiO_2 e uma camada superior MIM (altura $h = 100nm$ e largura $w = 60nm$, $120nm$ e $180nm$) (vide Figura 2.19f). O metal utilizado foi a prata e o comprimento de onda utilizado foi $\lambda = 1,55\mu m$. Foi testada também uma estrutura substituindo o MIM por um IMI. Enquanto o guia de onda MIM apresenta menor distância de propagação em comparação com o IMI, o confinamento mais alto resulta em um espaçamento menor (distância de centro a centro entre os guias de onda adjacentes).

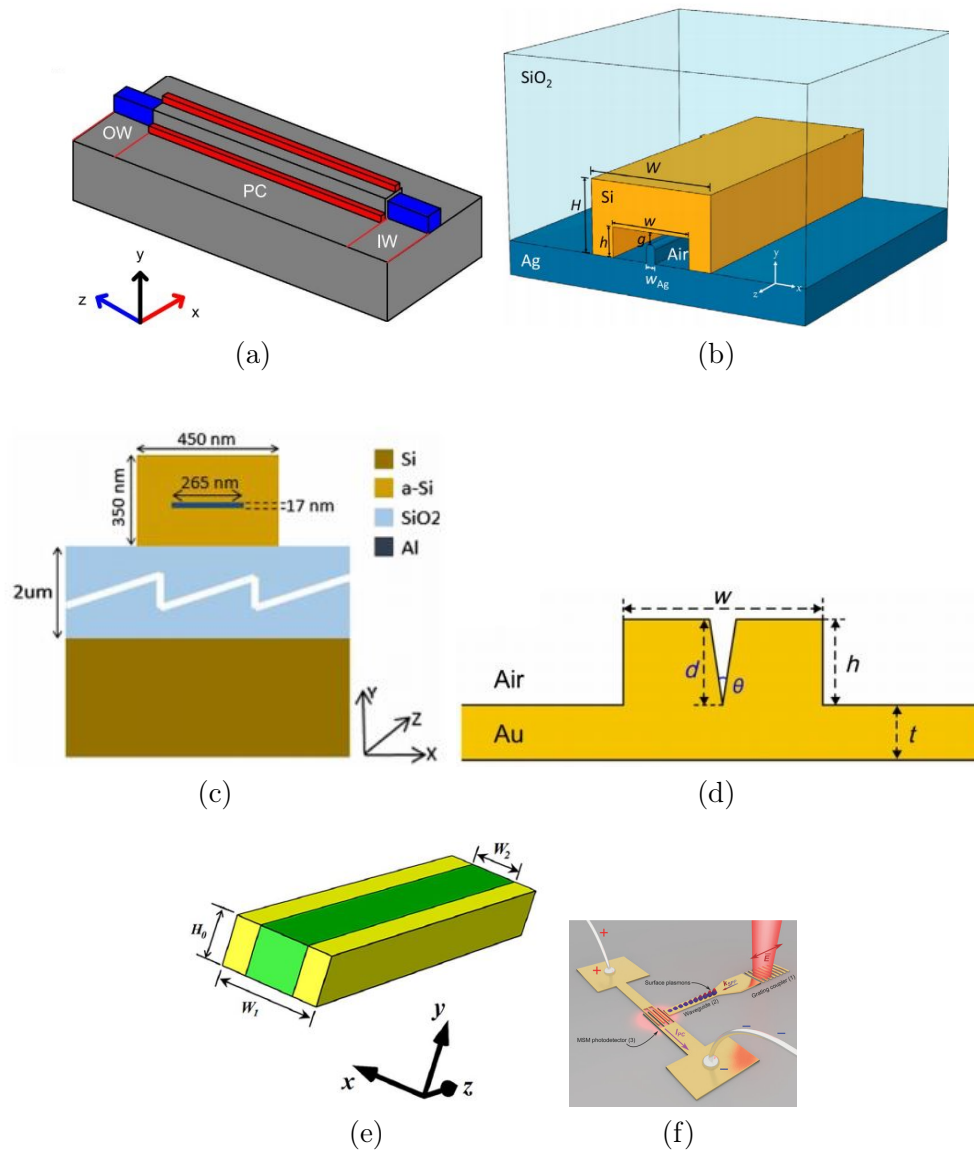


Figura 2.20: Geometrias: (a) Estrutura com núcleo de Si revestido com SiO_2 e 02 fitas Ag nas diagonais (Wang et al., 2017). (c) Fina fita de alumínio embebida por Si amorfo e separada de camada de Si por $d = 2\mu m$ preenchido por SiO_2 (Sturlesi et al., 2018). (d) fita metálica assimétrica com uma cunha em formato de V (Gan et al., 2018). (e) Guia de onda MIM (Ag + Diamante) (Liu et al., 2018). (f) Um esquemático composto por 03 partes: uma grade acopladora onde há a excitação, um guia de onda plasmônico com formado por Si, uma camada adesiva de Ti e Au e um fotodetector MSM (Metal-Semicondutor-Metal) (Panchenko et al., 2018)

Wang et al. (2017) propôs uma estrutura composta de um núcleo de silício ($H_{Si} = 310nm$, $W_{Si} = 310nm$ e $L_{Si} =$) revestido de SiO_2 ($H_{SiO_2} = 50nm$, $W_{SiO_2} = 50nm$ e $L_{SiO_2} = 4,58\mu m$) e 02 fitas de seção retangular de prata ($H_{Ag} = 120nm$, $W_{Ag} = 120nm$ e $L_{Ag} = 4,58\mu m$) nas diagonais. Sob toda a estrutura há um substrato de SiO_2 . A eficiência dessa estrutura mostrada na Figura 2.20a ficou em 99,9% a um comprimento de onda de $\lambda = 1,55\mu m$. Alterando comprimento de onda para a faixa de $\lambda = 1,53\mu m$ para $1,565\mu m$, a eficiência ficou em 99,6%.

O esquema de Jung (2017) consiste em um substrato de prata onde é depositada

uma camada de silício ($H = 118,8nm$ e $W = 93,1nm$) vazada ($h = 38,9nm$ e $w = 87,1nm$) onde há uma fita de prata ($W_{Ag} = 6,2nm$) envolta em ar. Toda essa estrutura é revestida de SiO_2 (vide Figura 2.20b). O comprimento de onda de operação é $\lambda = 1,55\mu m$. Um algoritmo genético foi utilizado a fim de otimizar a geometria. A partir dos resultados, é possível notar que o índice de refração efetivo cai quando a largura da fita aumenta e a altura da camada de silício diminui.

Em 2018, uma estrutura formada por uma fina fita de alumínio ($t = 17nm$) embebida por silício amorfo ($w = 450nm$ x $h = 350nm$) e separada de uma camada de silício por $d = 2\mu m$ preenchido por sílica foi idealizada por [Sturlesi et al. \(2018\)](#). Essa estrutura mostrada na Figura 2.20c, minimiza as perdas de propagação e operava a um comprimento de onda $\lambda = 1,55\mu m$, tendo como comprimento de acoplamento resultante $L_c = 27\mu m$. A partir de simulações variando a espessura da fita metálica, verificou-se que a distância de acoplamento diminuiu dramaticamente a medida que a fita vai ficando mais espessa ($t = 10nm$ gera $L_c = 90\mu m$ e $t = 50nm$ gera $L_c = 5\mu m$).

Um modelo constituído de uma fita metálica assimétrica com uma cunha em formato de V com ângulo $\theta = 16$, raio da ponta $r = 5nm$ e profundidade $d = 400nm$ e cujos parâmetros são largura $w = 700nm$, altura superior $h = 400nm$ e altura inferior $t = 200nm$ foi apresentado por [Gan et al. \(2018\)](#) (vide Figura 2.20d). O comprimento de onda de operação é $\lambda = 900nm$ e o comprimento de acoplamento é $L_c = 29\mu m$. Além disso, como os modos de guia de ondas foram fortemente confinados, as perdas de inserção foram bastante reduzidas para valores abaixo de 3dB.

[Liu et al. \(2018\)](#) retratou um esquema de guia de onda MIM suspenso, onde a membrana é formada pelo material dielétrico com comprimento ao longo da direção z, largura ao longo da direção x ($W_2 = 150nm$) e espessura ao longo da direção y ($H_o = 250nm$) (vide Figura 2.20e). O metal escolhido foi a prata e o dielétrico, o diamante, preterindo materiais como Si , $LiNbO_3$ e TeO_2 devido a suas boas características ópticas, mecânicas e térmicas, como alta banda proibida ($5,48eV$), alto módulo de Young, alta condutividade térmica e baixo coeficiente de expansão térmica. O comprimento de onda de operação é $\lambda = 637nm$.

Um esquemático proposto por [Panchenko et al. \(2018\)](#) é composto por 03 partes: uma grade acopladora onde há a excitação, um guia de onda plasmônico com $11,75\mu m$ formado por silício, uma camada adesiva de titânio ($2nm$ de espessura) e ouro ($85nm$ de espessura) e um fotodetector MSM (Metal-Semicondutor-Metal) (vide Figura 2.20f). O comprimento de onda de operação é $\lambda = 635nm$. Essa técnica pode permitir a integração de *plasmons* de superfície como portadores de sinal em futuros circuitos integrados optoeletrônicos de alta velocidade.

Tabela 2.1: Estado da arte de acoplamento entre guias dielétricos e plasmônicos.

<i>Referencia</i>	<i>Ano</i>	<i>Geometria</i>	$L_c(\mu m)$	$\eta(\%)$	$\lambda(\mu m)$
Liu	2007	fitas horizontais de <i>Au</i> e de dielétrico cercadas por <i>SiO₂</i>	<200	-	1,55
Liu	2007	Uma fita horizontal de <i>Au</i> e 02 de dielétrico cercadas por <i>SiO₂</i>	408	-	1,55
Chen	2007	Dispositivo formado por Si, <i>SiO₂</i> com um buraco, ar e Ag	-	-	-
Boltasseva	2007	Camada de <i>Ni</i> e <i>Au</i> em forma de V embutido pelo vácuo	1,3-120	-	1,43-1,52
Grandidier	2008	camada dielétrica de PMMA depositada sobre película de <i>Au</i> sob substrato de vidro	6,5	69	0,78
Verhagen	2008	Guia de onda de <i>Au</i> e <i>Al₂O₃</i> com íons de Er e substrato de safira	16	-	1,48
Degiron	2008	fitas de <i>Au</i> curvadas em 90° com raios variáveis, embebidas em BCB, depositadas em substrato de <i>SiO₂</i> e envoltas por ar	-	-	1,55
Degiron	2009	fitas de <i>Au</i> e SU-8 curvadas em 90° com raios variáveis, embebidas em BCB, depositadas em substrato de <i>SiO₂</i> e envoltas por ar	-	95	1,55
Lee	2009	fita de Ag unida a 02 camadas de polímero de alto <i>n</i> e englobadas por um polímero de baixo <i>n</i>	-	-	1,31
Kim	2009	Guia assimétrico com camadas de Si, <i>SiO₂</i> e Cu revestidos por PMMA	4	-	1,55
Gao	2010	Bandagem de nanofuros circulares plasmônicos em substrato de vidro com uma fina camada de <i>Au</i>	8-12,5	-	0,50-0,78
Delacour	2010	02 fitas de Cu separadas por um slot dielétrico e embebidas em <i>SiO₂</i>	1	75	1,55
Verhagen	2010	Cunha dielétrica de Si depositada em um substrato de Ag envoltos em ar	0,2	70	0,577-0,628
Summers	2011	Acoplador com substrato de InP, seguido de uma camada de InGaAsP e uma de <i>Au</i>	7	-	1,55

He	2011	Guia de onda SOI com núcleo de <i>Si</i> , fina camada <i>SiO₂</i> e fita de <i>Au</i> com nanoponta	2,2	50	1,55
Kong	2011	Guia de onda dielétrico e outro plasmônico (elétrons evaporados de <i>Au</i>) embebidos em <i>SiO₂</i>	5	66	0,828
Desiatov	2011	Ponta de <i>Si</i> acoplada a uma guia de onda de <i>SiO₂</i>	2	75	1,55
Liu	2011	fitas de <i>Au</i> e <i>SiN</i> separadas por distancia <i>D</i> cercadas por camadas de <i>SiO₂</i> com distintos índices de refração <i>n</i>	>99	$1,7e^3$	1,55
Choi	2012	Dispositivo formado por guia de onda isolado de <i>Si</i> e guia de onda híbrido plasmonico (<i>Al - SiO₂ - Si - SiO₂ - Al</i>)	2,6	90	1,55
Fevrier	2012	Guia de onda de <i>Si</i> , fina camada de <i>Ti</i> e cadeia de nanopartículas de <i>Au</i> .	2,6	90	1,4
Chen	2012	Acoplador composto de guia de onda <i>SiO₂ - Si - SiO₂</i> e guia de onda <i>SiO₂ - Si - SiO₂ - Ag - SiO₂ - Si - SiO₂</i>	11,4-185	99-82,8	1,55
Marini	2013	SPPs guiada ao longo do nanofio de <i>Au</i> envolvido pelo vidro de <i>SiO₂</i> com raio de 50 a 500nm	-	-	0,7-0,9
Lindquist	2013	Pirâmide 3D com ponta nanofocalizadora plasmônica em forma de C	-	-	-
Du	2014	Acopladores direcionais verticais IMI e MIM	>0,5	-	1,55
Dai	2014	Um guia de onda dielétrico reto e outro híbrido curvo	1,1-2,2	-	-
Hai	2015	Guia de ondas híbrido <i>SiO₂ - Si - SiO₂ - Ag - SiO₂ - Si - SiO₂</i> , um nanofio e um triângulo de <i>Ag</i>	59,96	-	1,55
Wieduwilt	2015	Bastão de <i>SiO₂</i> rodeado por camadas de <i>Nb</i> , coberto com <i>Al₂O₃</i> e embutido em líquido com <i>n</i> predefinido	-	-	0,73
Kim	2015	Guia de onda de fita de <i>Si</i> , espaçador de óxido fino e tampa metálica feita de <i>Cu</i> , <i>Au</i> , <i>Ag</i> ou <i>Al</i>	<5	78	-
Luo	2015	Triângulo isósceles de <i>Au</i>	0,750	92	1,55

Smith	2015	Ranhura cônica em forma de V	31-62	-	1,03-1,55
Tuniz	2015	Fibra de índice degrau de SiO_2 com núcleo de GeO_2 e um guia de onda de Au	-	37	0,65
Tellez-Limon	2016	Nanopartícula de Au inserida em núcleo de Si	-	82	1,048
Gan	2016	2 guias metálicos envoltos por ar e depositados em um filme metálico	-	-	0,83
Liu	2016	Guia de ondas de grafeno cônico com N multicamadas	-	-	50
Tuniz	2016	Nanoponta focalizadora	5,3	80	1,55
Grob	2016	Filme de Au depositado em uma camada de vidro formando uma nanoponta focalizadora	500	-	0,815
Chang	2016	Um guia inferior curvado e outro superior reto	-	95	1,55
Zhang	2017	Nano esfera Si apoiada em substrato Ag, separados por $g = 5nm$ e preenchido com SiO_2 de guia retangular Si	-	-	-
Magno	2017	MNP elíptico de Ag depositadas sobre guia de onda dielétrico (Si ou SIN_4) com substrato de SiO_2	-	74,5	1,45
Dutta	2017	Estrutura formada por camada de SiO_2 e camada MIM (Ag-dielétrico-Ag)	-	-	1,55
Wang	2017	Estrutura com núcleo de Si revestido com SiO_2 e 02 fitas Ag nas diagonais	-	99,9	1,55
Jung	2017	Camada Si onde há uma fita Ag envolta em ar depositado sob substrato Ag e revestida SiO_2	-	-	1,55
Sturlesi	2018	Fina fita de Al embebida por Si amorfo e separada de camada de Si por $d = 2\mu m$ preenchido por SiO_2	5-90	-	1,55
Gan	2018	fita metálica assimétrica com uma cunha em formato de V	29	-	0,9
Liu	2018	Guia de onda MIM (Ag + Diamante)	-	-	0,637
Panchenko	2018	Uma grade acopladora, um guia de onda plasmônico e um fotodetector MSM.	-	-	0,635

Capítulo 3

Resultados e Discussões

3.1 Acoplador Híbrido Plasmônico

A geometria do acoplador é apresentada na Figura 3.1 e consiste em um guia de onda dielétrico de largura w constituído por material com índice de refração n_d e um guia de onda metálico com espessura t . Os guias estão afastados de um comprimento d e envoltos por um substrato de sílica. A direção de propagação da onda é ao longo do eixo x . As dimensões do arranjo para a simulação inicial são descritas na Tabela 3.1 e foram baseadas no artigo de Tuniz (Tuniz and Schmidt, 2016). O material dielétrico utilizado não foi informado na supracitada bibliografia, o que leva a crer que trata-se de uma liga formada para que o índice de refração seja 1,87. O modo fundamental do guia de onda dielétrico é usado como campo incidente e o mesmo está localizado em $x=-2\mu\text{m}$.



Figura 3.1: Esquema do acoplador híbrido plasmônico composto por guia de onda dielétrico e metálico, envoltos por substrato.

Tabela 3.1: Parâmetros da configuração inicial.

Parâmetros	Valores
Índice de Refração do guia dielétrico (n_d)	1,87
Índice de Refração do Substrato (n_s)	1,444
Espessura do guia metálico (t)	15nm
Espessura do guia dielétrico (w)	500nm
Espessura da PML (h_{PML})	$2\mu\text{m}$
Distância entre os guias (d)	400nm
Comprimento de Onda (λ)	$1,55\mu\text{m}$

As partes real e imaginária do índice de refração de um dado metal variam de acordo com o comprimento de onda utilizado (é possível verificar esse comportamento para os metais utilizados nessa dissertação nas Figuras B.1 (Prata), B.2 (Ouro) e B.3 (Cobre)). As propriedades dos metais estão descritas na Tabela 3.2 de acordo com Johnson and Christy (Johnson and Christy, 1972).

Tabela 3.2: Propriedade dos metais com variação do comprimento de onda.

$\lambda(\mu\text{m})$	Metal	Índice de Refração (n)	Permissividade (ε)
1,50	Prata	0,13986 -j 10,963	-120,17 +j 3,0666
	Ouro	0,49410 -j 10,353	-106,94 +j 10,231
	Cobre	0,67889 -j 10,268	-104,97 +j 13,942
1,55	Prata	0,14447 -j 11,366	-129,17 +j 3,2841
	Ouro	0,59950 -j 10,795	-115,13 +j 11,259
	Cobre	0,71576 -j 10,655	-113,02 +j 15,253
1,60	Prata	0,14908 -j 11,769	-138,50 +j 3,5091
	Ouro	0,55401 -j 11,132	-123,62 +j 12,335
	Cobre	0,75263 -j 11,043	-121,37 +j 16,622

Para gerar a malha, se utiliza elementos quadráticos com tamanho máximo geral de $0,25\mu\text{m}$. Visando otimizar a malha, seleciona-se a região do metal e determina-se que naquela parte o tamanho máximo geral dos elementos é igual a $0,01\mu\text{m}$ e na região dos dielétricos, $0,10\mu\text{m}$. Nas demais partes, permanece $0,25\mu\text{m}$. Esses valores foram escolhidos para atingir a convergência.

Para controlar a mudança do tamanho dos elementos entre regiões, define-se o gradiente de transição de tamanhos de elementos como 0,6 (valores entre 0 e 1). Quanto maior o gradiente, mais nítida a mudança de tamanho no espaço. Essa configuração gerou 93.442 elementos de triângulo e 187.169 número de nós (vide Figura 3.2) e a simulação demorou em média 04 minutos para ser executada.

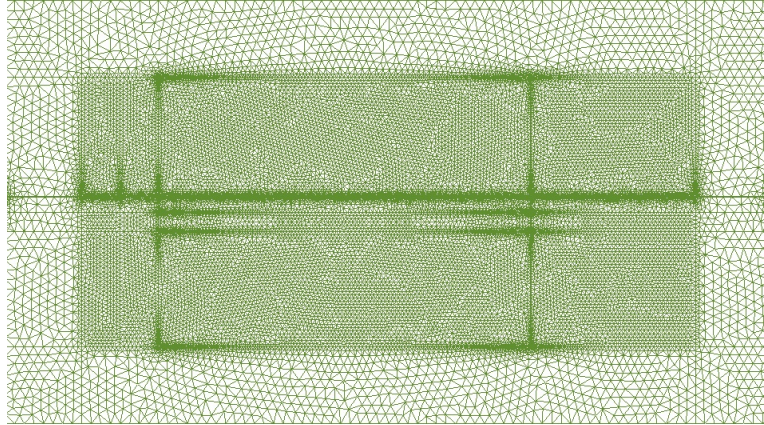


Figura 3.2: Malha simulada para os parâmetros iniciais do acoplador híbrido plasmônico composto por guia de onda dielétrico e metálico envoltos por substrato.

Os resultados das simulações estão mostrados na Figura 3.3 onde nota-se que ocorre o acoplamento do sinal óptico do guia dielétrico para o plasmônico com valores de potência consideráveis. Devido aos valores da permissividade elétrica do ouro e cobre serem bem próximos, os resultados são bastante semelhantes. Determina-se a distância de acoplamento para a prata como $L_c = 4,785\mu m$, ouro $L_c = 5,120\mu m$ e cobre $L_c = 5,125\mu m$. Dentre os modelos simulados, o que utiliza a prata apresenta maior transferência de energia ($|E| = 3,294$), uma vez que o cobre e o ouro ($|E| = 2,329$ e $|E| = 2,530$, respectivamente) apresentam alta absorção para esse comprimento de onda.

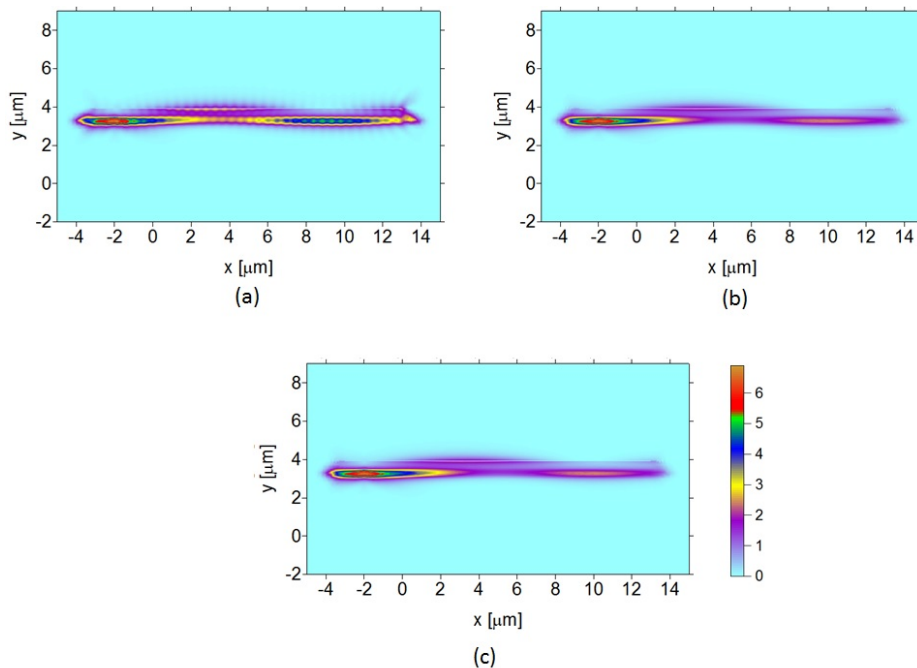


Figura 3.3: Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico com $w = 500nm$ e $n_d = 1,87$ distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (a) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$.

Alterando o comprimento de onda de operação para $\lambda = 1,60\mu m$ (Figura 3.4) e $\lambda = 1,50\mu m$ (Figura 3.5), o modelo foi simulado novamente para os 03 metais.

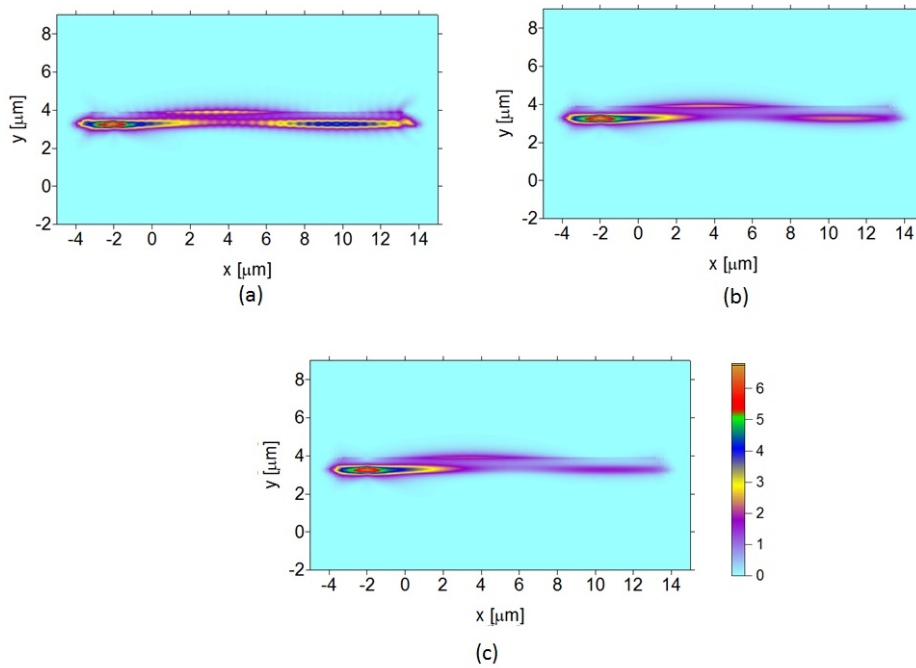


Figura 3.4: Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico com $w = 500nm$ e $n_d = 1,87$ distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (a) cobre operando a $\lambda = 1,60\mu m$

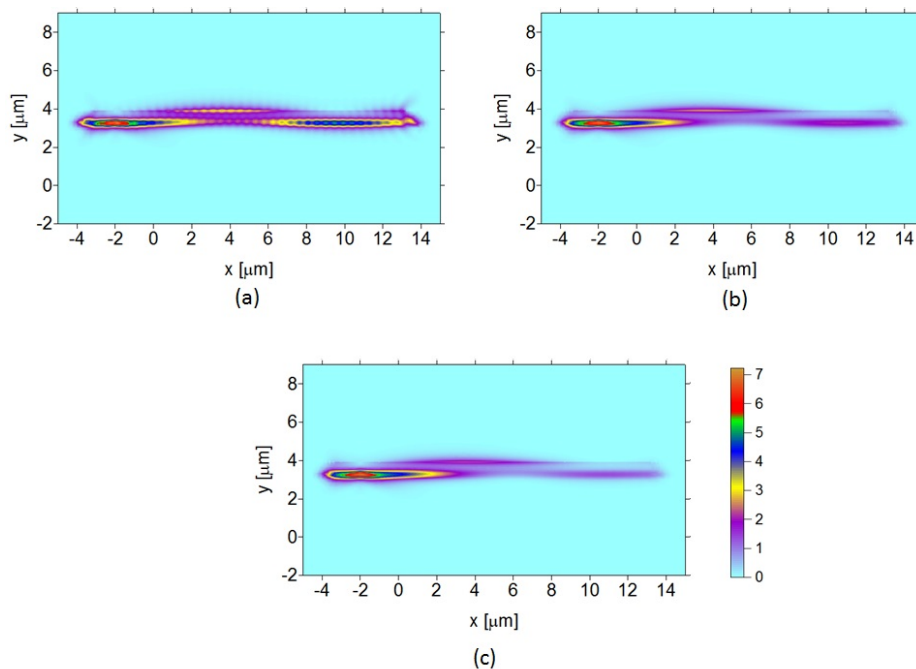


Figura 3.5: Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico com $w = 500nm$ e $n_d = 1,87$ distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (a) cobre operando a $\lambda = 1,50\mu m$.

A partir dos resultados das simulações, pode ser observado que o acoplamento do sinal óptico do guia dielétrico para o plasmônico gera uma variação na ordem de 300nm para a prata e 200nm para o ouro e o cobre com a alteração do comprimento de onda de operação para $\lambda=1,50, 1,55$ e $1,60 \mu m$. A Tabela 3.3 mostra a distância de acoplamento para cada comprimento de onda e material. Essa relação é diretamente proporcional, ou seja, quanto maior o comprimento de onda, maior a distância de acoplamento e a intensidade do campo elétrico no guia plasmônico.

Tabela 3.3: Comparativo da distância de acoplamento variando o comprimento de onda para cada metal.

Material	$\lambda(\mu m)$	$L_c(\mu m)$	$ E $
Ag	1,50	4,655	3,059
	1,55	4,785	3,294
	1,60	4,955	3,433
Au	1,50	5,025	2,446
	1,55	5,120	2,530
	1,60	5,240	2,516
Cu	1,50	5,025	2,285
	1,55	5,125	2,329
	1,60	5,245	2,308

A fim de analisar a influência da geometria no acoplamento, o espaçamento entre os guias plasmônico e dielétrico foi variado de 200nm a 500nm com intervalos de 100nm. As Figuras 3.6 a 3.8 retratam os resultados da simulações.

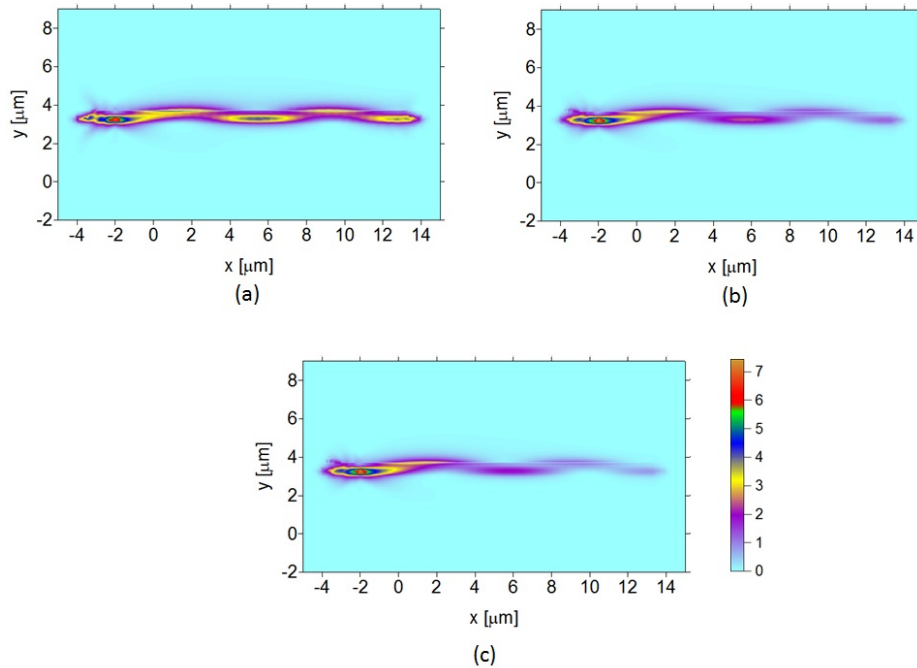


Figura 3.6: Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico com $w = 500nm$ e $n_d = 1,87$ distante de $d = 200nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (a) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$

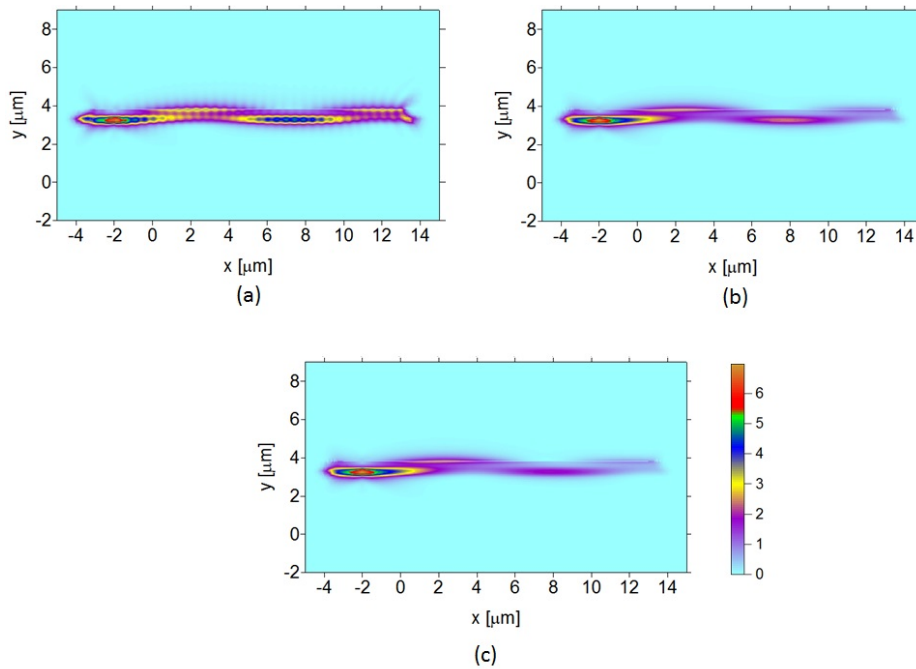


Figura 3.7: Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico com $w = 500nm$ e $n_d = 1,87$ distante de $d = 300nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (a) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$

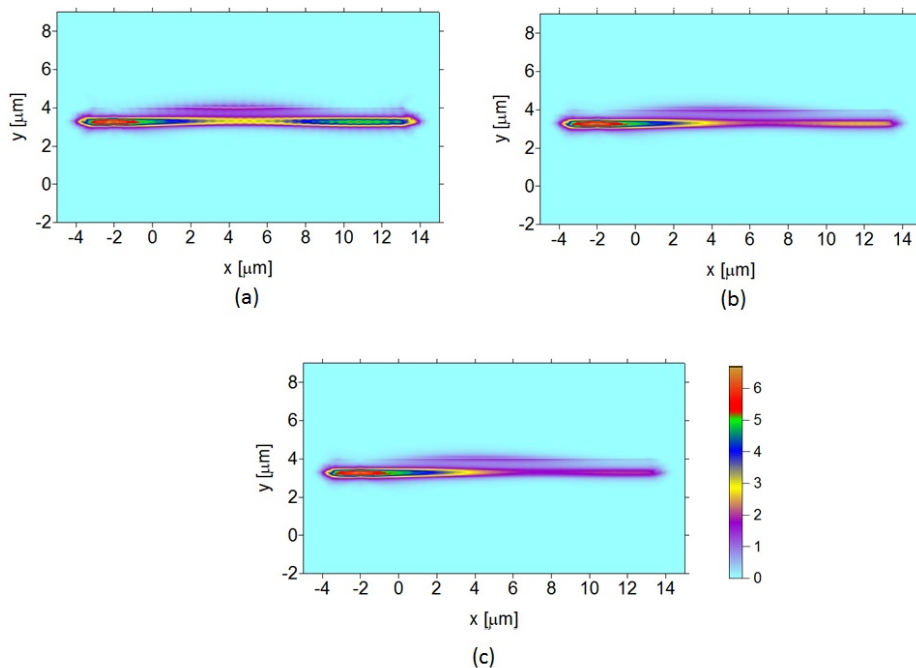


Figura 3.8: Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico com $w = 500nm$ e $n_d = 1,87$ distante de $d = 500nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (a) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$.

Com o aumento do espaçamento entre os guias, a distância de acoplamento também aumenta e conseqüentemente, o campo acoplado diminui. É possível perceber que para $d = 500nm$, não há acoplamento.

Repetindo todas as simulações para os comprimentos de onda $\lambda = 1,50\mu m$ e $\lambda = 1,60\mu m$, é possível gerar os gráficos comparativos da distância de acoplamento e campo versus distância entre os guias dielétrico e plasmônico (Figura 3.9). Nota-se que, para os metais simulados, o valor do espaçamento entre os guias para atender as premissas de baixa distância de acoplamento e alto valor de campo deve ser de $d = 200nm$.

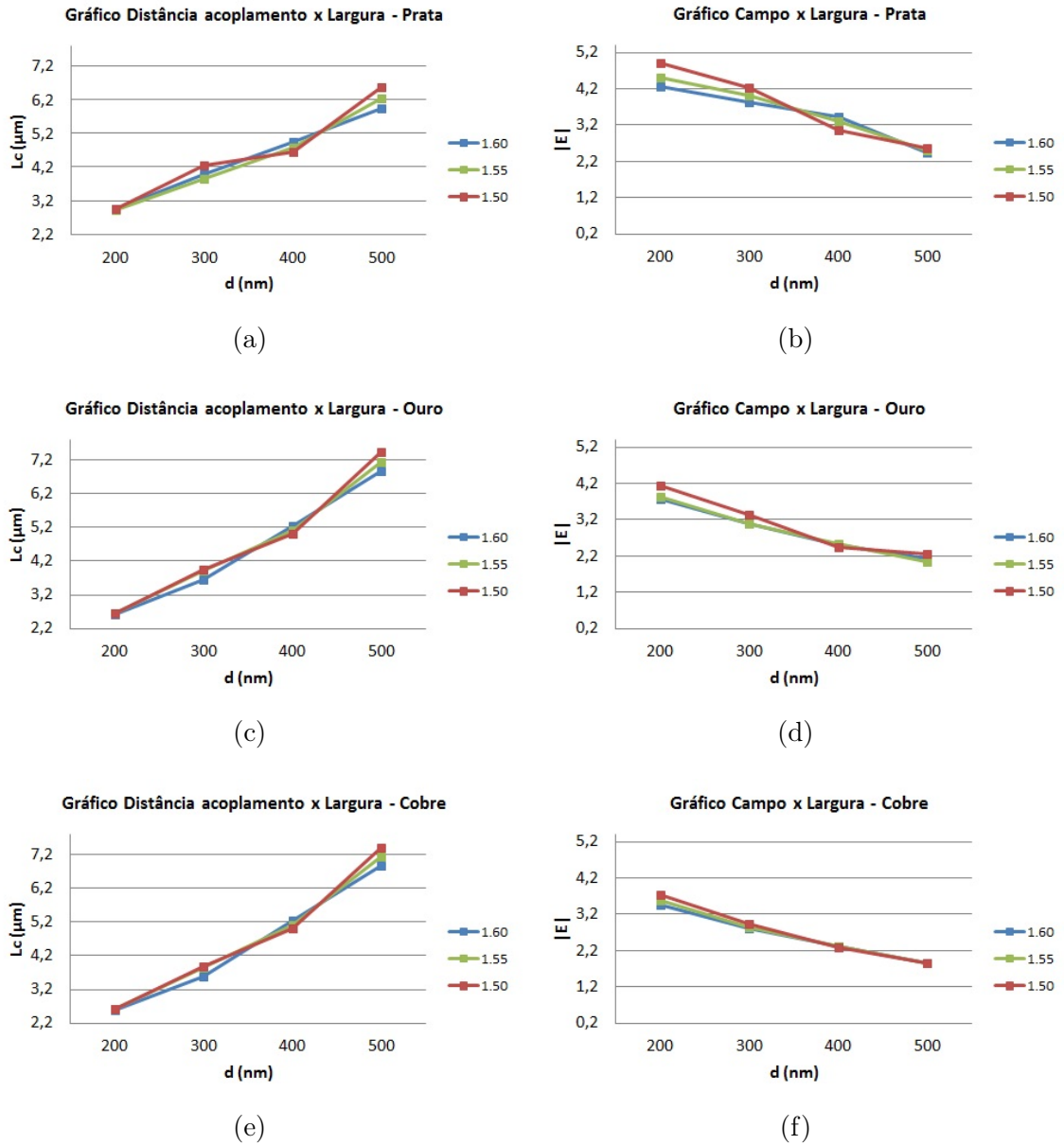


Figura 3.9: Gráfico da distância de acoplamento (L_c) versus espaçamento entre os guias dielétrico e metálico (d) para $\lambda=1,50, 1,55$ e $1,60 \mu m$ e guia metálico composto por (a) prata, (c) ouro e (e) cobre e do campo ($|E|$) versus espaçamento entre os guias dielétrico e metálico (d) para (b) prata, (d) ouro e (f) cobre.

Alterando a espessura do guia de onda metálico de 15nm para 20nm (malha com 99.758 elementos de triângulo e 199.797 número de nós) e mantendo o espaçamento entre os guias fixo em 400nm, temos os resultados na Figura 3.10.

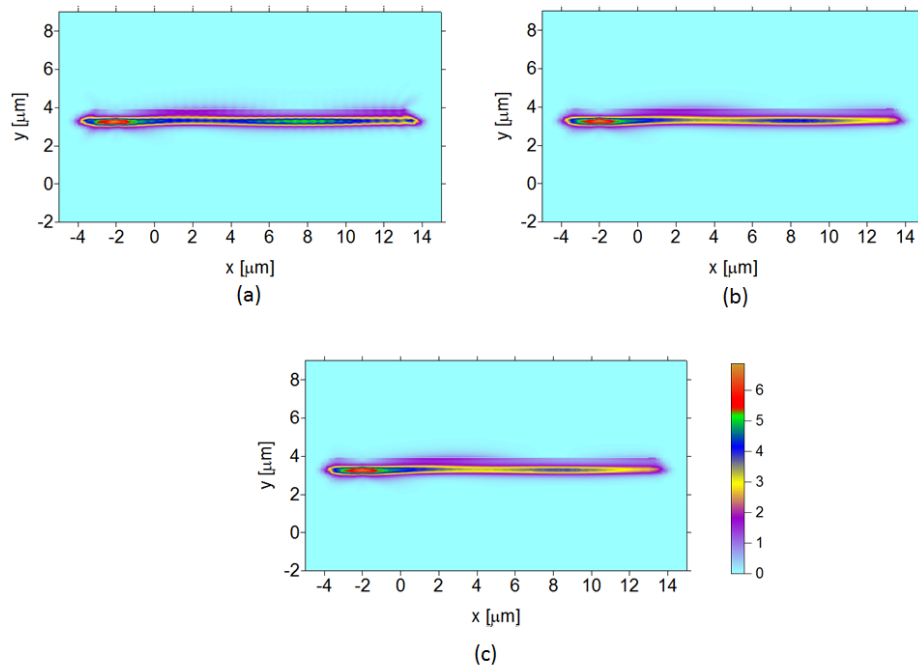


Figura 3.10: Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico com $w = 500nm$ e $n_d = 1,87$ distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 20nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (a) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$

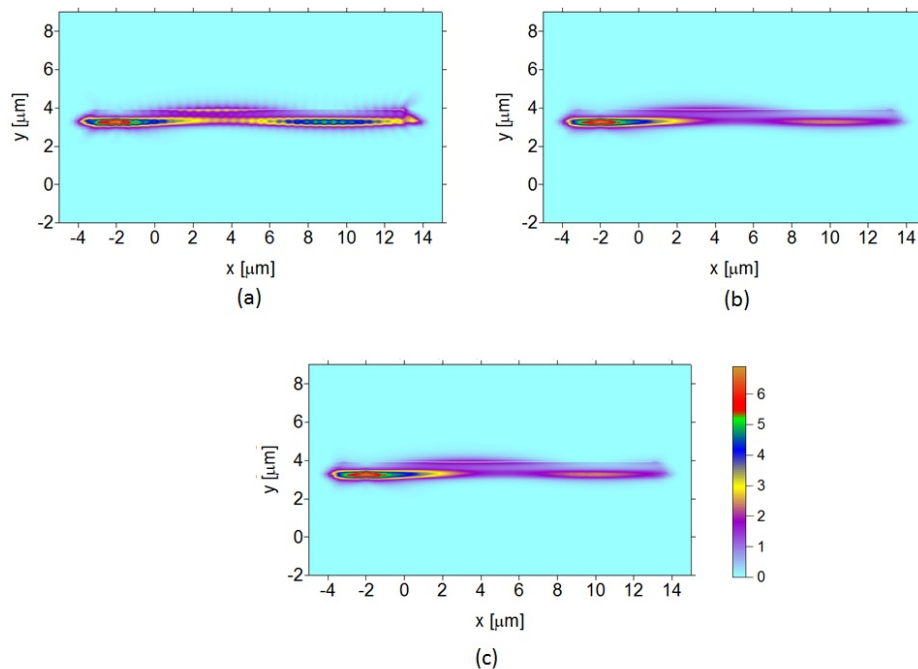


Figura 3.11: Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico com $w = 500nm$ e $n_d = 1,87$ distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 25nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (a) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$

Repetindo todas as simulações para os comprimentos de onda $\lambda = 1,50\mu m$ e $\lambda = 1,60\mu m$, é possível gerar os gráficos comparativos da distância de acoplamento e campo versus distância entre os guias dielétrico e plasmônico (Figura 3.12). O comportamento apresenta um pico em $t = 20nm$ tanto para L_c quanto para $|E|$. Dessa forma, a escolha dos parâmetros dependerá do que se necessita no projeto. Na literatura, não é comumente utilizado valores inferiores a $t = 15nm$, nem acima de $t = 25nm$ por apresentar espalhamento do campo.

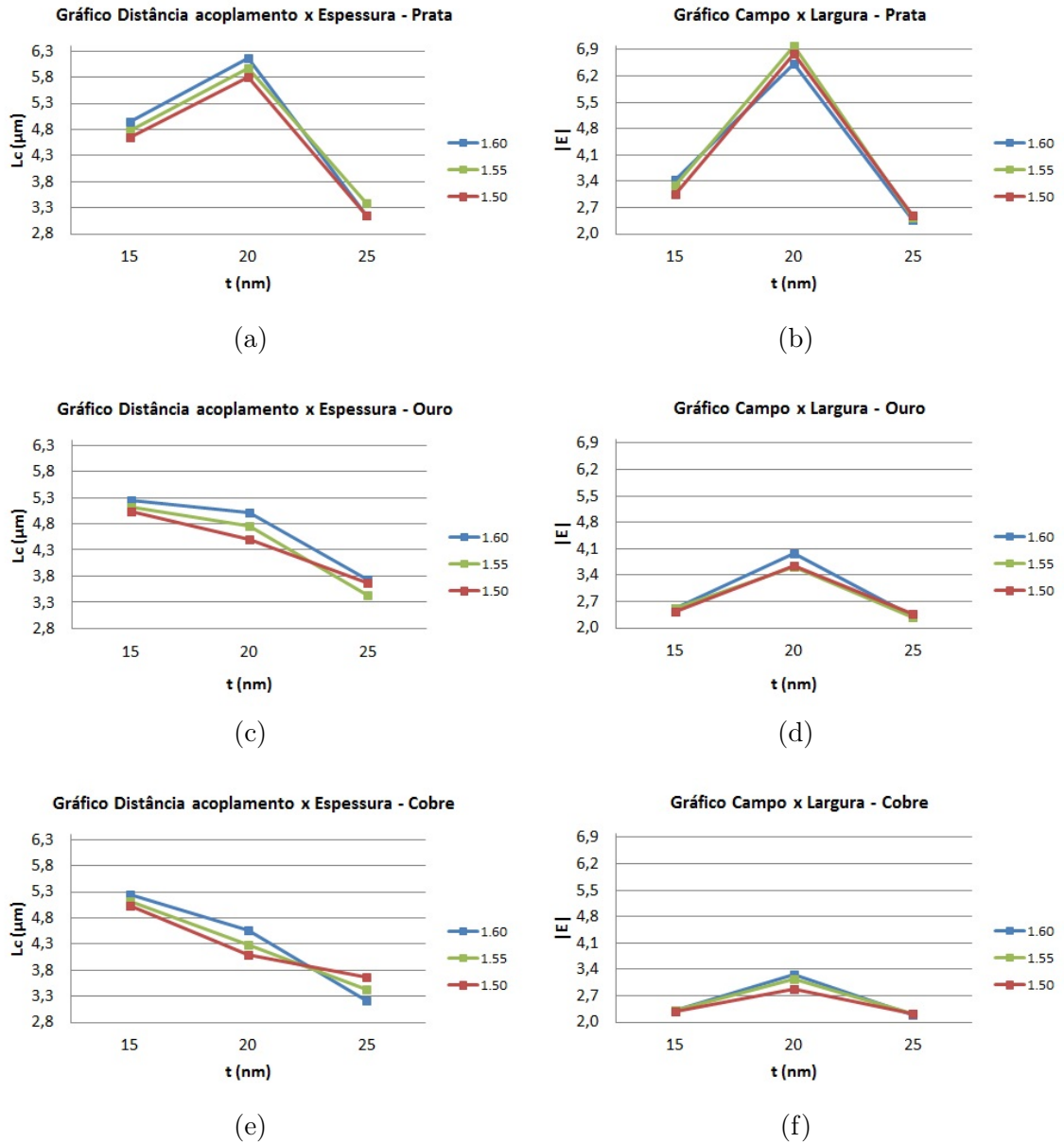


Figura 3.12: Gráfico da distância de acoplamento (L_c) versus espessura do guia metálico (t) para $\lambda = 1,50, 1,55$ e $1,60 \mu m$ e guia metálico composto por (a) prata, (c) ouro e (e) cobre e do campo ($|E|$) versus espessura do guia metálico (t) para (b) prata, (d) ouro e (f) cobre.

Também foi analisada a dependência da largura do guia dielétrico, variando esse parâmetro em 300 nm (Figura 3.13) e 400 nm (Figura 3.14).

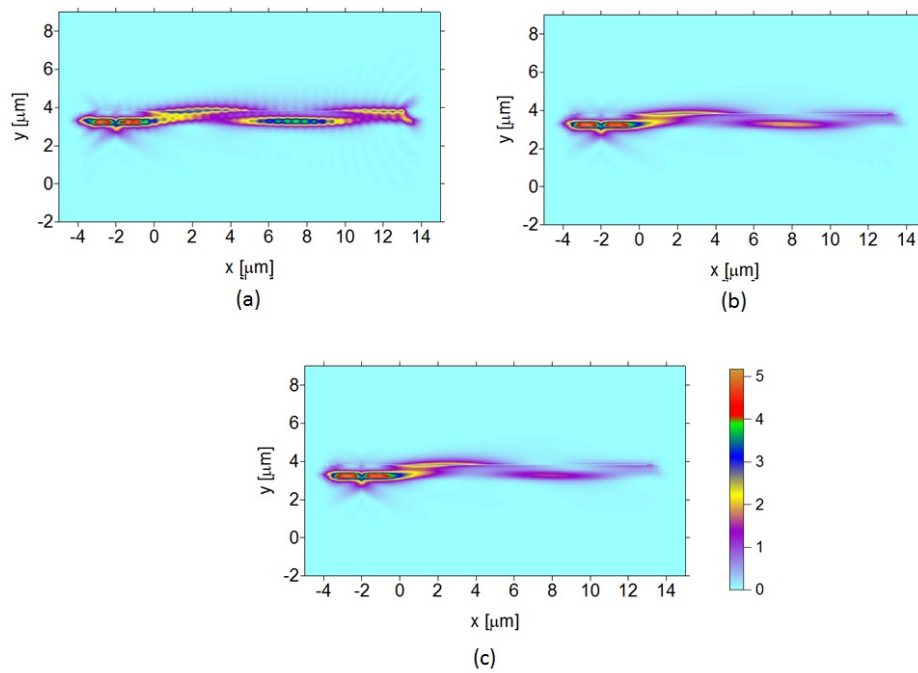


Figura 3.13: Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico com $w = 300nm$ e $n_d = 1,87$ distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (a) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$.

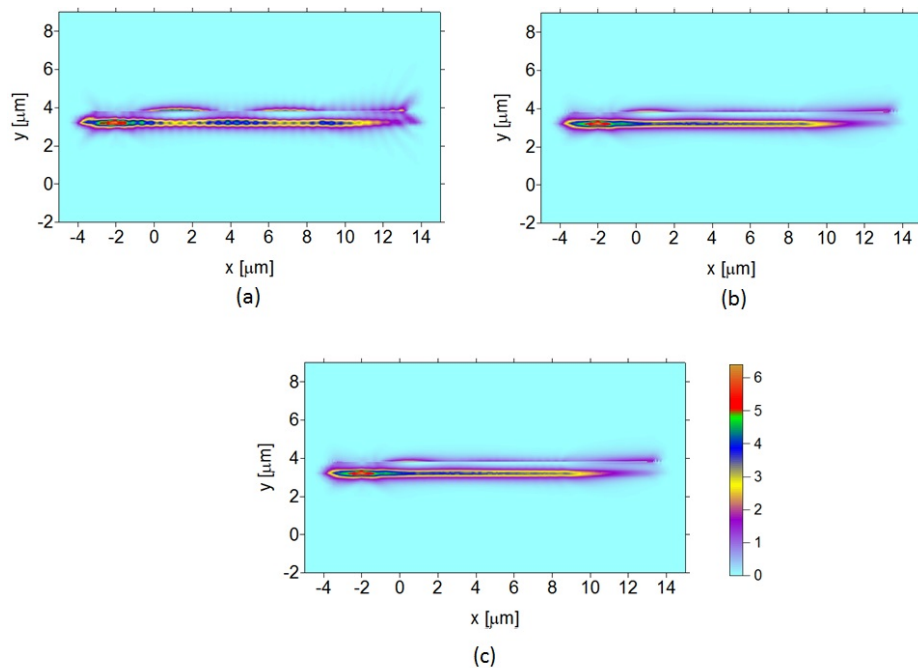


Figura 3.14: Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico com $w = 400nm$ e $n_d = 1,87$ distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (a) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$.

Repetindo todas as simulações para os comprimentos de onda $\lambda = 1,50\mu m$ e $\lambda = 1,60\mu m$, é possível gerar os gráficos comparativos da Figura 3.15. O comportamento revela que a configuração $w = 400nm$ operando a $\lambda = 1,55\mu m$ é a que apresenta menor distância de acoplamento ($3,380\mu m$ - prata, $2,635\mu m$ - ouro e $2,325\mu m$ - cobre) e maior módulo de campo elétrico ($5,410$ - prata, $3,046$ - ouro e $2,696$ - cobre).

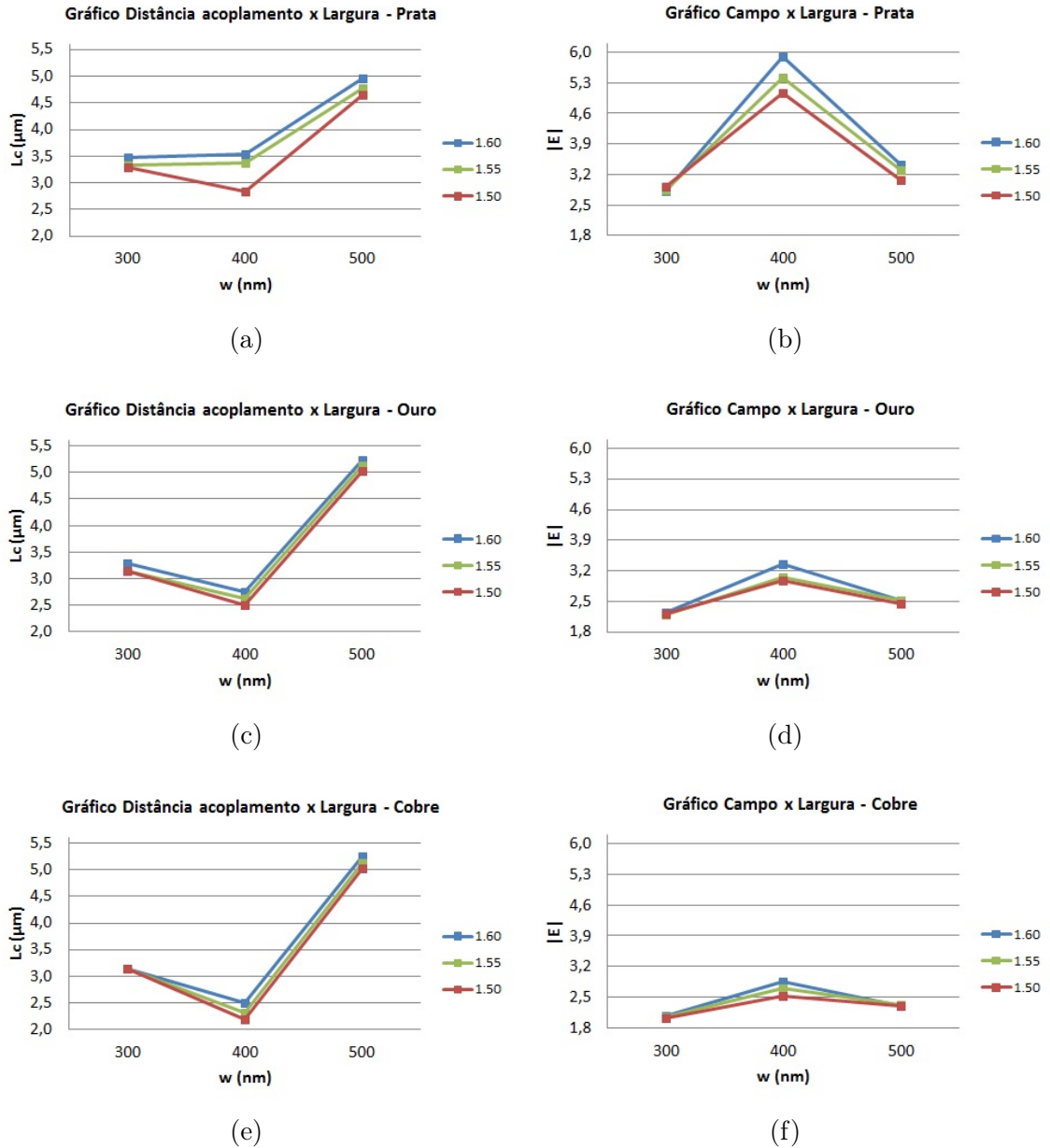


Figura 3.15: Gráfico da distância de acoplamento (L_c) versus largura do guia dielétrico (w) para $\lambda=1,50$, $1,55$ e $1,60 \mu m$ e guia metálico composto por (a) prata, (c) ouro e (e) cobre e do campo ($|E|$) versus largura do guia dielétrico (w) para (b) prata, (d) ouro e (f) cobre.

A dependência do acoplamento com o índice de refração do dielétrico n_d também é avaliada. Estabelecendo a distância entre o guia metálico e dielétrico em $d = 400nm$ e a largura do guia metálico em $t = 15nm$, foram realizadas simulações variando o material dielétrico. O índice dos materiais foi considerado pelo estudo de Malitson and

Dodge (Malitson and Dodge, 1972) para o Al_2O_3 como $n = 1,746$ e de Luke (Luke et al., 2015) para o Si_3N_4 como $n = 1,997$. Os resultados estão descritos nas Figuras 3.16 a 3.17.

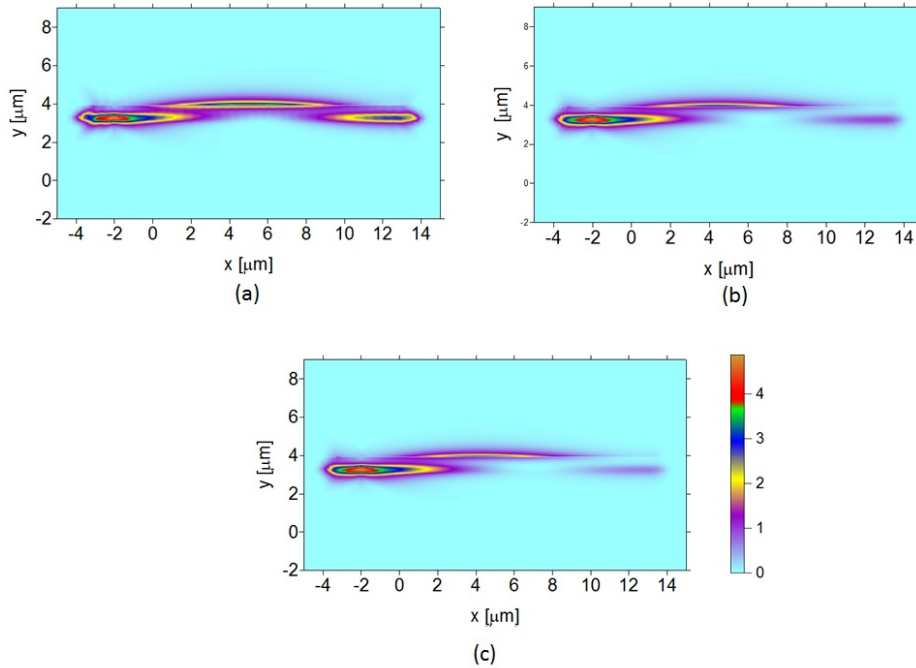


Figura 3.16: Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico com $w = 500nm$ e $n = 1,746$ (Al_2O_3) distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (a) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$

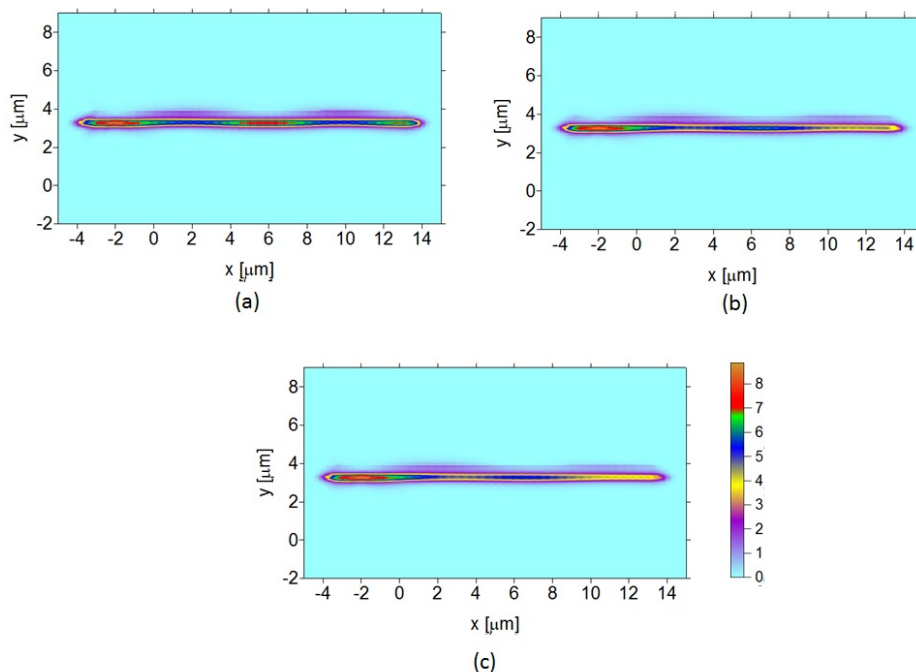


Figura 3.17: Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico com $w = 500nm$ e $n = 1,997$ (Si_3N_4) distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (a) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$.

Repetindo todas as simulações para os comprimentos de onda $\lambda = 1,50\mu m$ e $\lambda = 1,60\mu m$, é possível gerar os gráficos comparativos da Figura 3.18.

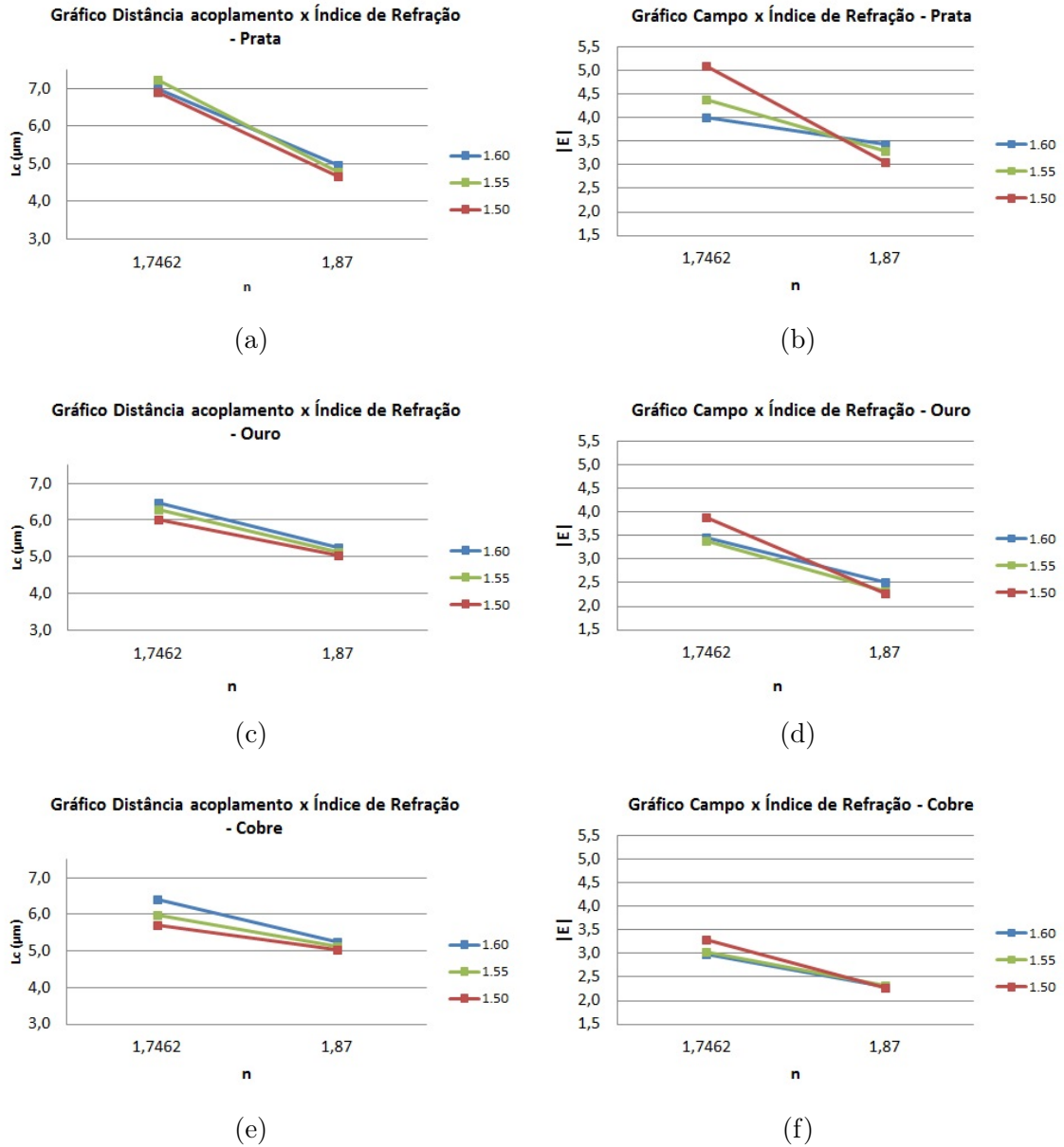


Figura 3.18: Gráfico da distância de acoplamento (L_c) versus índice de refração do guias dielétrico (n) para $\lambda=1,50, 1,55$ e $1,60 \mu m$ e guia metálico composto por (a) prata, (c) ouro e (e) cobre e do campo ($|E|$) versus índice de refração do guias dielétrico (n) para (b) prata, (d) ouro e (f) cobre.

Para o índice de refração do Si_3N_4 não houve acoplamento. Já comparando os resultados do Al_2O_3 com o material de índice pré-determinado $n_d = 1,87$, percebe-se maior acoplamento em Al_2O_3 . Dessa maneira, quanto menor o índice de refração, maior o acoplamento até um certo valor.

3.2 Acoplador Híbrido Plasmônico Segmentado

O guia dielétrico do acoplador híbrido plasmônico foi substituído por um guia de onda segmentado ou SGW. Para essa simulação, o período do guia foi de $\Lambda = 300nm$ e a largura do guia dielétrico $w = 300nm$ e é constituída de dois materiais, sendo o primeiro com largura igual a $b = 150nm$. A razão entre estes parâmetros é chamada ciclo de trabalho ou η . Esses valores foram escolhidos, pois segundo Mercedes (Rubio-Mercedes et al., 2009), para um comprimento de onda de $\lambda = 1,55\mu m$, o período da estrutura deve ser da ordem de 300nm.

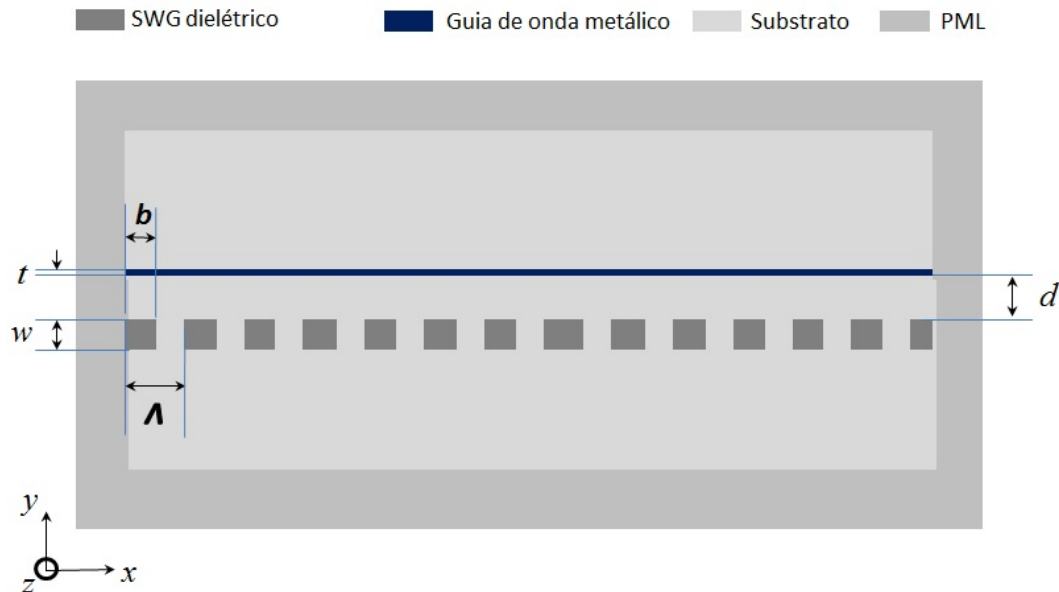


Figura 3.19: Esquema do acoplador híbrido plasmônico com guia de onda segmentado (PSW).

Para se realizar a simulação, é preciso encontrar o índice de refração equivalente n_{eq} ao de um guia de onda contínuo (CWG) através da Equação 2.2 para possibilitar o cálculo do modo de propagação. O primeiro material cujo índice de refração é n_1 é variado e o segundo é sempre sílica, material do substrato cujo índice de refração é n_2 . Nesse trabalho, foram usados 03 conjuntos de dielétricos a princípio separados igualmente dentro do segmento ($\eta = 0.5$): $Si + SiO_2$, $Si_3N_4 + SiO_2$ e $Al_2O_3 + SiO_2$ (vide 3.4).

Tabela 3.4: Valores do índice de refração equivalente do guia PSW.

Conjunto	n_1	n_2	n_{eq}
$Si + SiO_2$	3,760	1,444	2,460
$Si_3N_4 + SiO_2$	2,463	1,444	1,953
$Al_2O_3 + SiO_2$	1,763	1,444	1,604

Nas Figuras 3.20 a 3.22 são mostrados os resultados das simulações.

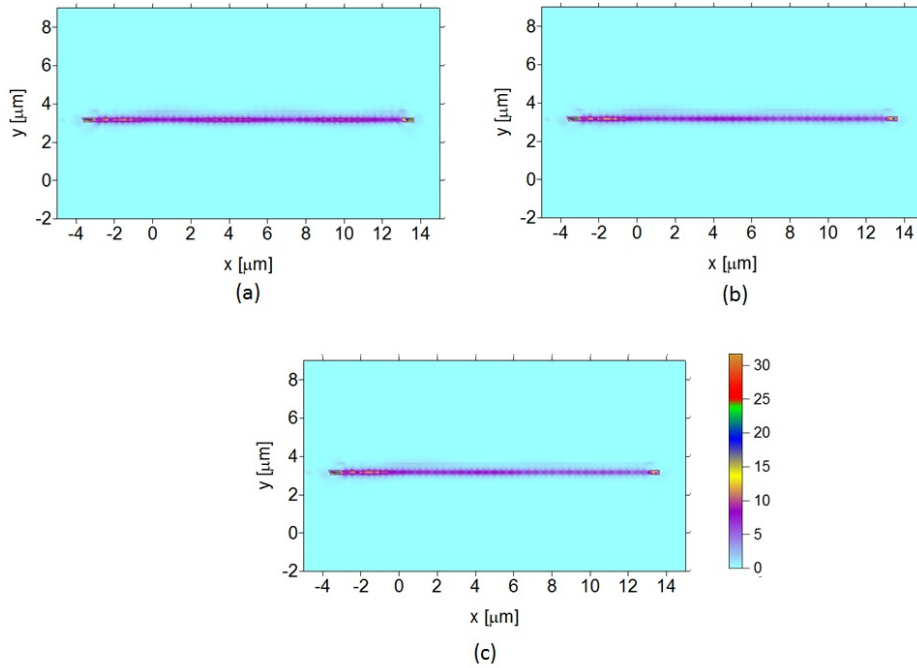


Figura 3.20: Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico PSW com $w = 300nm$, $\eta = 50\%$ e $n_{eq} = 2,460$ ($SiO_2 + Si$) distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (c) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$.

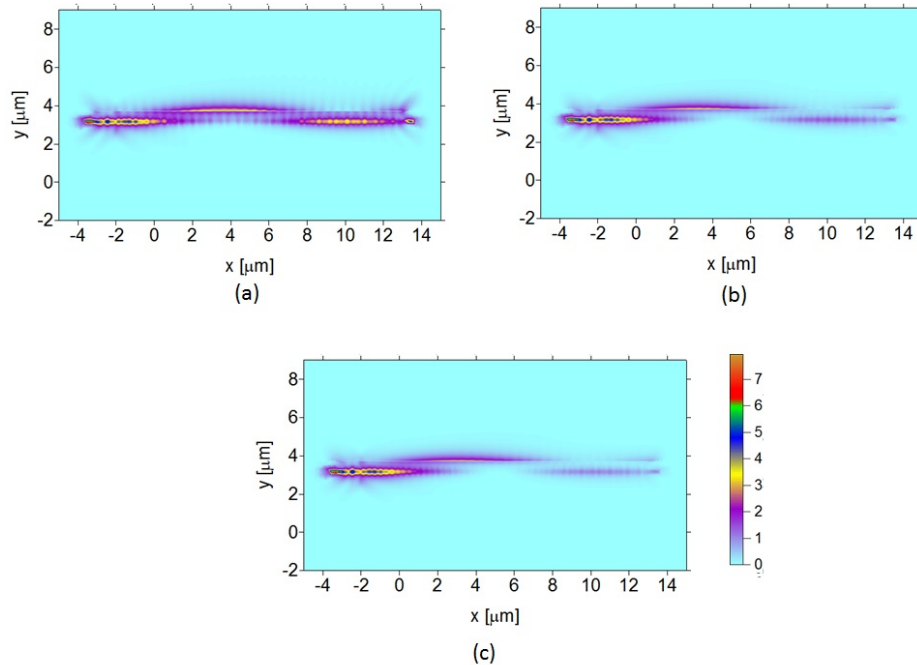


Figura 3.21: Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico PSW com $w = 300nm$, $\eta = 50\%$ e $n_{eq} = 1,953$ ($Si_3N_4 + SiO_2$) distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (c) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$

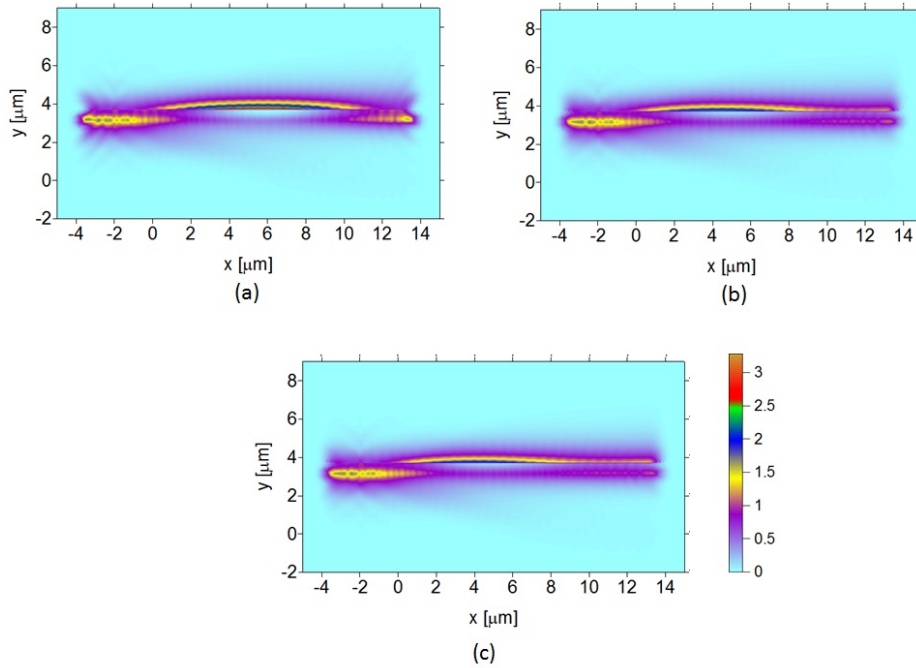


Figura 3.22: Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico PSW com $w = 300nm$, $\eta = 50\%$ e $n_{eq} = 1,604$ ($Al_2O_3 + SiO_2$) distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (c) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$

Observa-se que a partir de um dado índice de refração, não há mais acoplamento. Com base nos resultados, é possível observar que só não há acoplamento do PSW para o guia metálico para o conjunto $Si + SiO_2$. Quando o índice de refração no guia dielétrico é maior, o campo fica bem confinado no centro do guia e o campo evanescente responsável pelo acoplamento é minimizado.

Para $n_{eq} = 1,953$ operando a $\lambda = 1,55 \mu m$, a distância de acoplamento é $L_c = 5,720 \mu m$ para a prata, $L_c = 5,300 \mu m$ para o ouro e o cobre. O campo ficou em $|E| = 4,004$ para prata, $|E| = 3,416$ para o ouro e $|E| = 3,207$ para o cobre. Já para $n_{eq} = 1,604$, a distância de acoplamento e o campo é $L_c = 7,535 \mu m$ e $|E| = 3,296$ para a prata, $L_c = 6,515 \mu m$ e $|E| = 2,409$ para o ouro e $L_c = 6,000 \mu m$ e $|E| = 2,247$ para o cobre.

Repetindo as simulações para os comprimentos de onda $\lambda = 1,50\mu m$ e $\lambda = 1,60\mu m$, é possível gerar os gráficos comparativos da Figura 3.23.

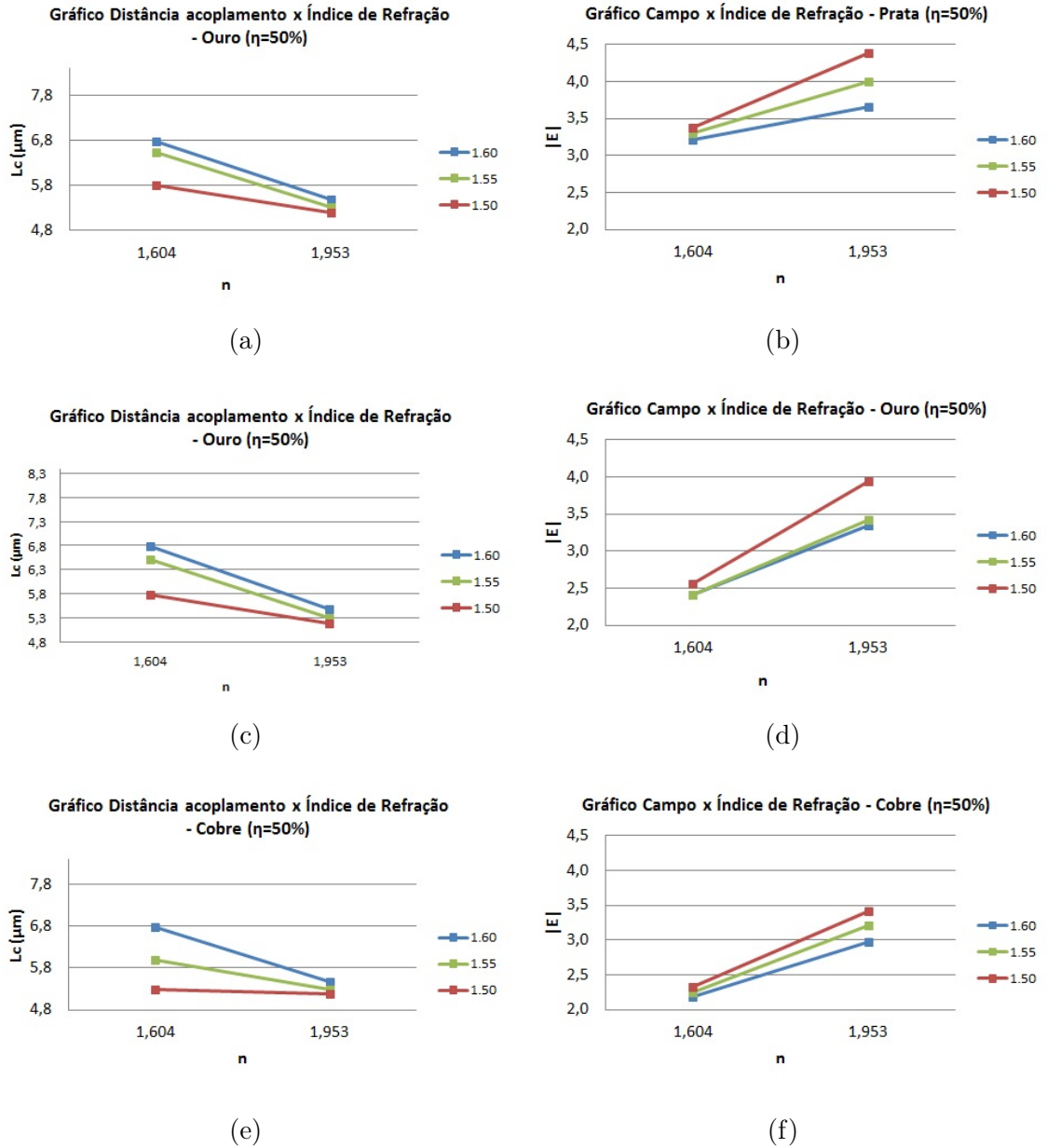


Figura 3.23: Gráfico da distância de acoplamento (L_c) versus índice de refração efetivo do guias dielétrico segmentado (n_{eq}) com *duty cycle* $\eta = 50\%$ para $\lambda=1,50$, $1,55$ e $1,60\mu m$ e guia metálico composto por (a) prata, (c) ouro e (e) cobre e do campo ($|E|$) versus índice de refração efetivo do guias dielétrico segmentado (n_{eq}) com *duty cycle* $\eta = 50\%$ para $\lambda=1,50$, $1,55$ e $1,60\mu m$ e guia metálico composto por (b) prata, (d) ouro e (f) cobre.

O valor do *duty cycle* η foi alterado para 0,25 e as simulações foram refeitas para 03 conjuntos, cujos novos índices de refração equivalentes são respectivamente, 1,952, 1,699 e 1,524. Nas Figuras 3.24 a 3.26 são mostrados os resultados das simulações.

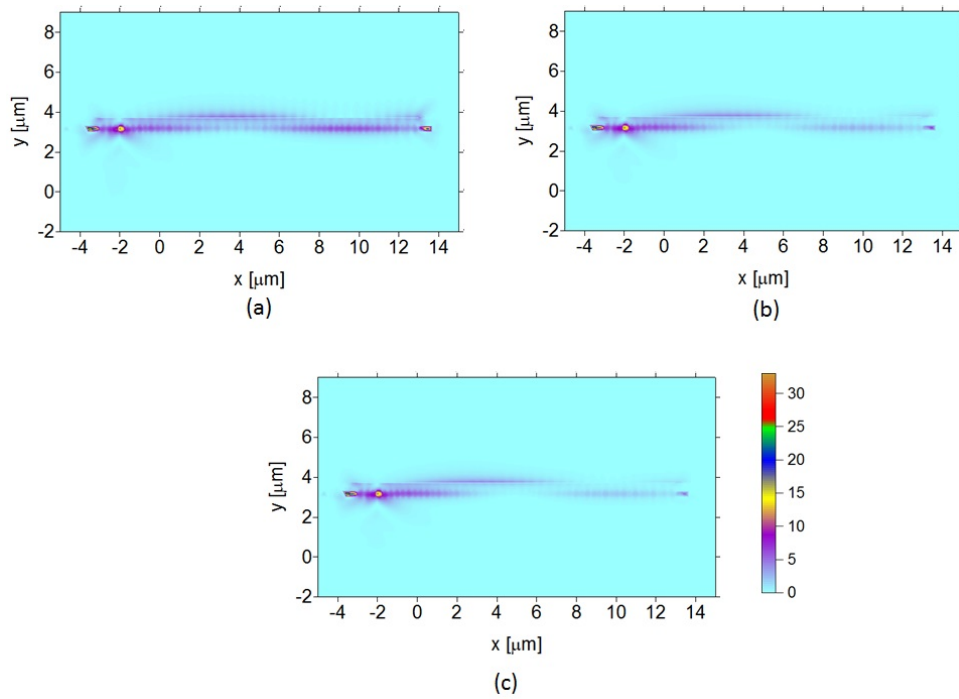


Figura 3.24: Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico PSW com $w = 300nm$, $\eta = 25\%$ e $n_{eq} = 1,952$ ($SiO_2 + Si$) distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (c) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$.

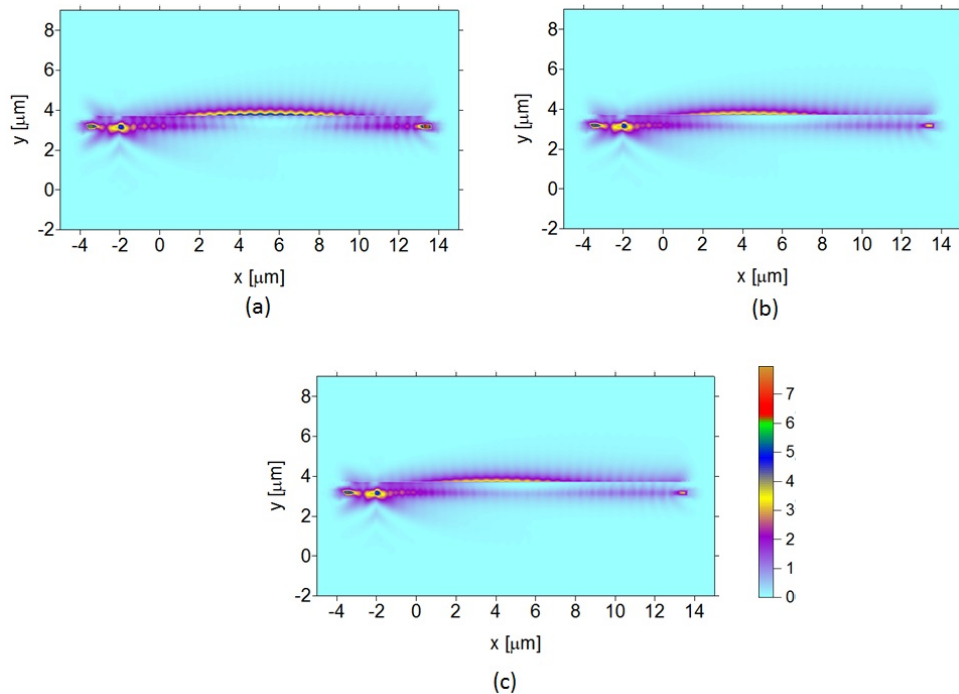


Figura 3.25: Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico PSW com $w = 300nm$, $\eta = 25\%$ e $n_{eq} = 1,699$ ($Si_3N_4 + SiO_2$) distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (c) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$

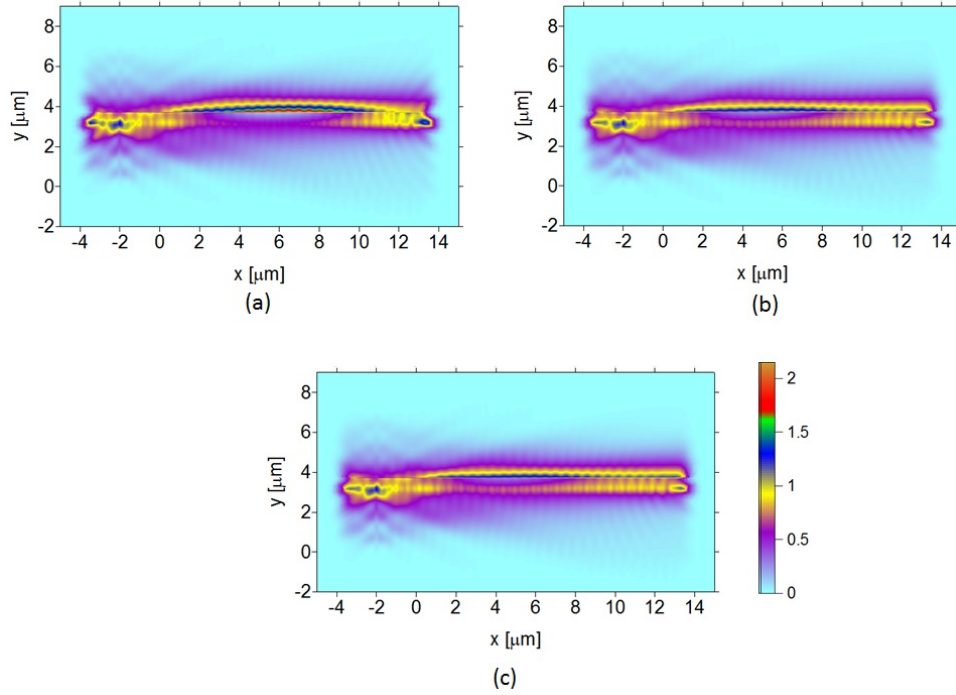


Figura 3.26: Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico PSW com $w = 300nm$, $\eta = 25\%$ e $n_{eq} = 1,524$ ($Al_2O_3 + SiO_2$) distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (c) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$

Para $n_{eq} = 1,952$ operando a $\lambda = 1,55 \mu m$, a distância de acoplamento é $L_c = 5,670 \mu m$ e $|E| = 5,677$ para a prata, $L_c = 5,265 \mu m$ e $|E| = 4,986$ para o ouro e $L_c = 5,265 \mu m$ e $|E| = 4,709$ para o cobre. Para $n_{eq} = 1,699$, $L_c = 7,560 \mu m$ e $|E| = 6,210$ para a prata, $L_c = 6,060$ e $|E| = 4,314$ para o ouro e $L_c = 6,060$ e $|E| = 3,963$ para o cobre. Já para $n_{eq} = 1,524$, a distância de acoplamento e o campo é $L_c = 8,480 \mu m$ e $|E| = 2,158$ para a prata, $L_c = 7,465 \mu m$ e $|E| = 1,575$ para o ouro e $L_c = 7,465 \mu m$ e $|E| = 1,473$ para o cobre.

A partir dos resultados, é possível observar que só não há acoplamento do PSW para o guia metálico para o conjunto $Si + SiO_2$. Repetindo as simulações para os comprimentos de onda $\lambda = 1,50\mu m$ e $\lambda = 1,60\mu m$, é possível gerar os gráficos comparativos da Figura 3.27.

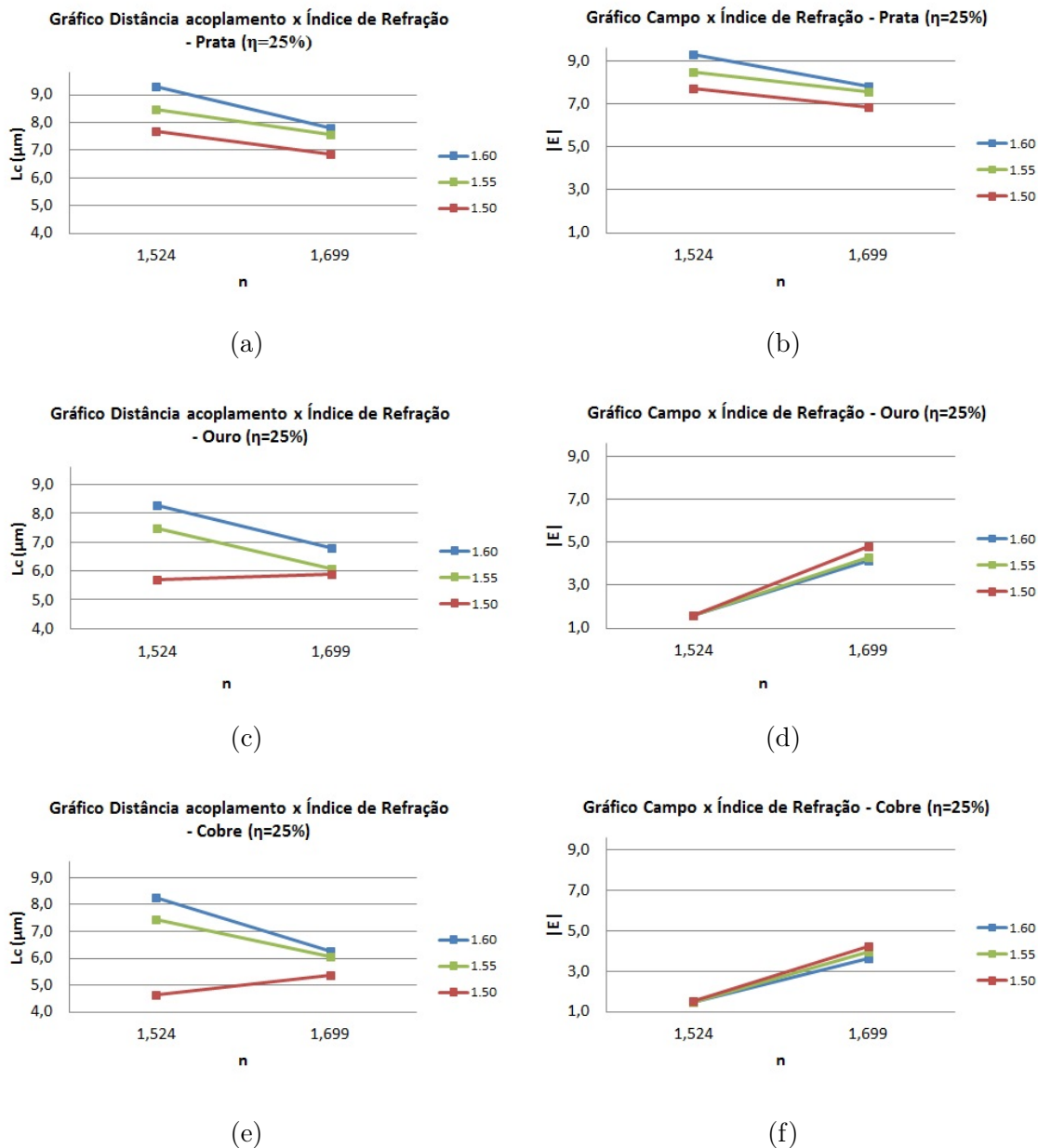


Figura 3.27: Gráfico da distância de acoplamento (L_c) versus índice de refração efetivo do guias dielétrico segmentado (n_{eq}) com *duty cycle* $\eta = 25\%$ para $\lambda=1,50, 1,55$ e $1,60 \mu m$ e guia metálico composto por (a) prata, (c) ouro e (e) cobre e do campo ($|E|$) versus índice de refração efetivo do guias dielétrico segmentado (n_{eq}) com *duty cycle* $\eta = 25\%$ para (b) prata, (c) ouro e (f) cobre.

Nas Figuras 3.28 a 3.30 são mostrados os resultados para um guia dielétrico contínuo de índice 2,460, 1,953 e 1,604.

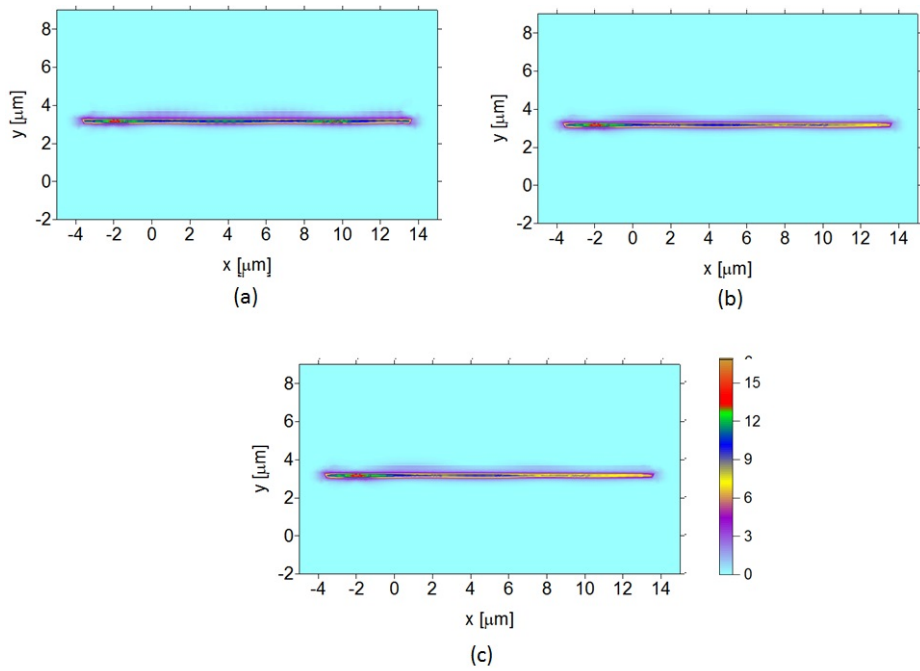


Figura 3.28: Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico CWG com $w = 300\text{nm}$ e $n = 2,460$ distante de $d = 400\text{nm}$ do guia metálico com $t = 15\text{nm}$ composto por (a) prata, (b) ouro e (c) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$

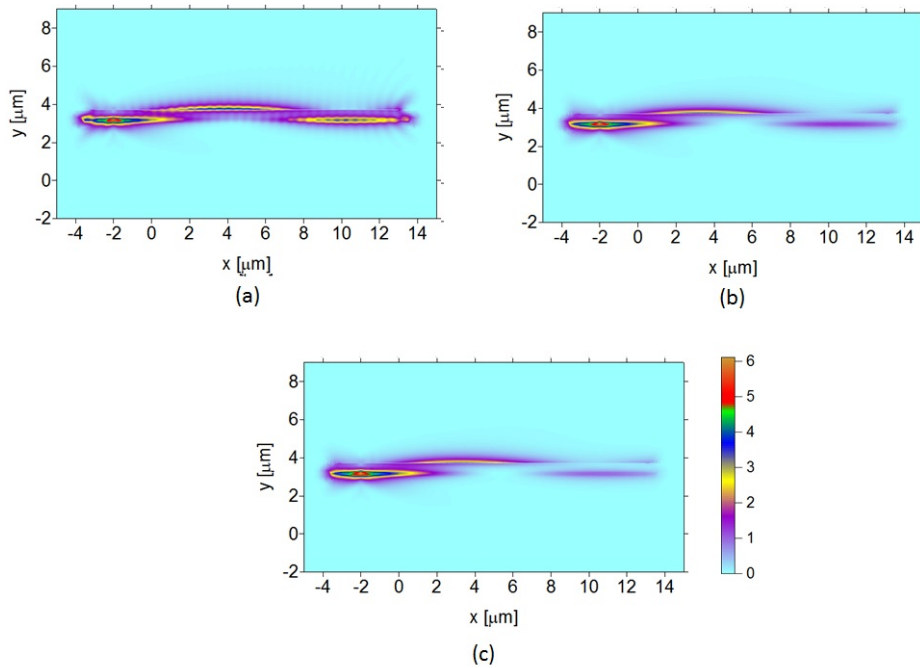


Figura 3.29: Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico CWG com $w = 300\text{nm}$ e $n = 1,953$ distante de $d = 400\text{nm}$ do guia metálico com $t = 15\text{nm}$ composto por (a) prata, (b) ouro e (c) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$

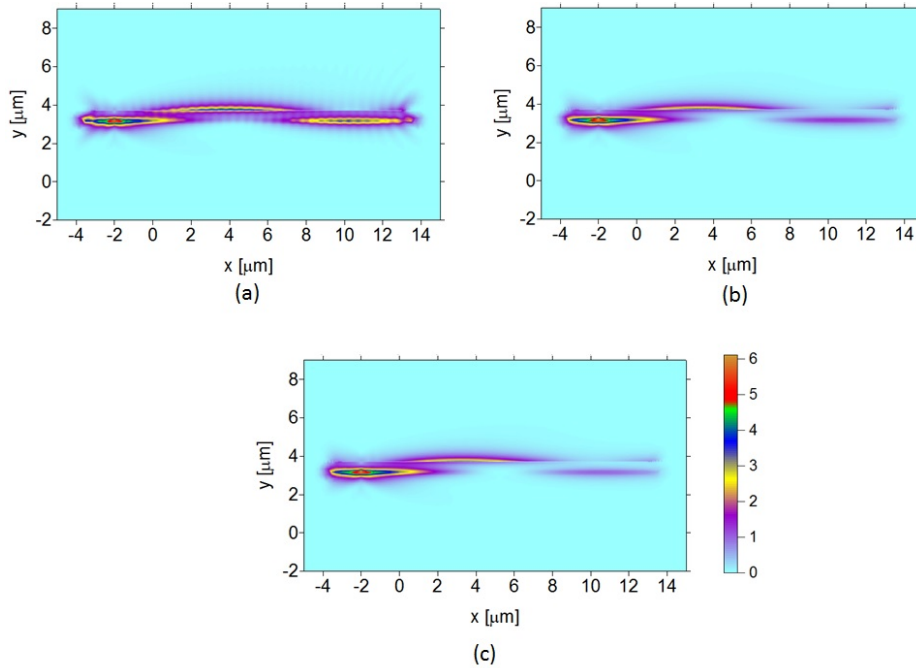


Figura 3.30: Distribuição espacial do campo para a simulação do acoplador híbrido plasmônico: guia dielétrico CWG com $w = 300nm$ e $n = 1,604$ distante de $d = 400nm$ do guia metálico com $t = 15nm$ composto por (a) prata, (b) ouro e (c) cobre operando a $\lambda = 1,55 \mu m$

Ao comparar os resultados, percebe-se a diferença entre os valores dos comprimentos de acoplamento do PSW e CWG são pequenos (variações de 1 a 16%).

Tabela 3.5: Valores comparativos do índice de refração equivalente do guia PSW $\eta = 50\%$ para $\lambda = 1,55 \mu m$.

n	Metal	$L_c(\mu m)$ - CWG	$L_c(\mu m)$ - PSW	$ E $ - CWG	$ E $ - PSW
1,953	prata	6,070	5,720	4,534	4,004
	ouro	5,590	5,300	3,663	3,416
	cobre	5,110	5,300	3,454	3,207
1,604	prata	7,630	7,535	3,360	3,296
	ouro	6,160	6,515	2,477	2,409
	cobre	6,120	6,000	2,312	2,247

Capítulo 4

Considerações Finais

4.1 Conclusões

Ao longo dessa dissertação, uma revisão bibliográfica foi apresentada destacando a teoria sobre *Plasmon Polariton de Superfície*, estruturas plasmônicas e seus principais usos nas diversas áreas (de comunicações ópticas a medicina) e as modelagens em elementos finitos utilizadas para esquemas dielétrico/metal/dielétrico (IMI) e metal/dielétrico/metal (MIM). Guias de onda dielétricos contínuos (CWG) e periódicos (PSW) foram mostrados. A teoria a cerca dos acopladores ópticos formados a partir de guias de onda, bem como estruturas utilizadas na literatura foram expostas no capítulo 2.

A partir dessas estruturas do estado da arte, definiu-se modelos de acopladores híbridos plasmônicos CWG e PSW compostos por guias de ondas dielétrico e metálico de espessura nanométrica que foram utilizados nesse trabalho. No projeto foi levado em consideração a dependência dos índices de refração dos materiais dielétricos em relação ao comprimento de onda de operação e nos modelos simulados houve alterações no comprimento de onda de operação, nas dimensões do acoplador (largura do guia de onda metálico e distância entre os guias), no índice de refração do dielétrico, no metal usado e no tipo de guia de onda (CWG ou PSW) analisando a eficiência e a distância de acoplamento.

Os resultados obtidos apresentaram satisfatória eficiência na conversão de energia do guia dielétrico para o plasmônico. Os valores encontrados na literatura estão de acordo com os simulados corroborando a eficácia do modelo computacional. A relação entre a distância de acoplamento e o comprimento de onda é diretamente proporcional, ou seja, quanto maior o comprimento de onda, maior a distância de acoplamento e a intensidade do campo elétrico no guia plasmônico. Com o aumento do espaçamento entre os guias, a distância de acoplamento também aumenta e conseqüentemente, o campo acoplado diminui.

Ao comparar os resultados entre os guias segmentados e o equivalente contínuo, percebe-se que no PSW os comprimentos de acoplamento são menores, chegando a variações de 1 a 16% dependendo do metal e comprimento de onda utilizados. Um dos benefícios do uso de PSW é a possibilidade de modificar o índice de refração proporcionando aplicações diversas (alto confinamento, baixa distância de acoplamento).

O esquema que apresentou menor distância de acoplamento ($L_c = 2,185\mu m$) era composto por um guia metálico de cobre com 15nm de espessura e por um guia dielétrico de largura de 400nm e índice de refração igual a 1,87, afastados de 400nm e operando a $\lambda = 1,50\mu m$ (Figura 3.15e). Enquanto que a configuração com guia de prata com 20nm de espessura e guia dielétrico de largura de 500nm e índice de refração igual a 1,87, afastados de 400nm e operando a $\lambda = 1,55\mu m$ (Figura 3.10a) apresentou maior intensidade de campo ($|E| = 6,9972$).

Os esquemas apresentados mostram que dependendo da finalidade, os parâmetros podem ser definidos, comprovando a flexibilidade do modelo. Assim, para casos de dispositivos optoeletrônicos, é interessante a busca de configurações com a mínima distância de acoplamento (L_c) com a finalidade de diminuir os dispositivos atuais. Já para casos onde se utiliza nanoponta focalizadora para litografia, por exemplo, a energia acoplada deve ser a maior possível.

Artigos científicos gerados a partir desse trabalho foram publicados em congressos internacionais e seus respectivos títulos e nomes dos eventos estão apresentados no Apêndice A.

4.2 Trabalhos futuros

Dentre as possibilidades verificadas na continuidade do projeto, destacam-se a utilização de outros materiais para o guia de onda metálico como alumínio e nióbio. Outra possibilidade é a modelagem de geometrias mais complexas que visem otimização do comprimento de acoplamento bem como a eficiência. A exemplo, acopladores baseados em estruturas fotônicas ou PCFs cuja possibilidade de variações nos diâmetros dos capilares traz um grande potencial de mudança na sua estrutura. A utilização de dispositivos com nanoponta focalizadora e/ou coletora também é uma linha de pesquisa complementar ao trabalho aqui exposto.

Referências Bibliográficas

- Alam, M. Z. (2012). *Hybrid Plasmonic Waveguides: Theory and Applications*. PhD thesis, Universidade de Toronto.
- Alavirad, M., Roy, L., and Berini, P. (2014). Optimization of plasmonic nanodipole antenna arrays for sensing applications. *Quantum Electron.*
- Amaral, A. M. (2012). Nanoestruturas plasmônicas para aplicações em Ótica não linear. Master's thesis, Universidade Federal do Pernambuco, Departamento de Física.
- Atwater, H. A. and Polman, A. (2010). Plasmonics for improved photovoltaic device. *Nature Materials*, 9:205–213.
- Bock, P. J., Cheben, P., Schmid, J. H., Lapointe, J., Delâge, A., Janz, S., Aers, G. C., Xu, D., Densmore, A., and Hall, T. J. (2010). Subwavelength grating periodic structures in silicon-on-insulator: a new type of microphotonic waveguide. *Optics Express*, 18:20251–20262.
- Boltasseva, A., Volkov, V. S., Nielsen, R. B., Moreno, E., Rodrigo, S. G., and Bozhevolnyi, S. I. (2008). Triangular metal wedges for subwavelength plasmon-polariton guiding at telecom wavelengths. *Optics Express*.
- Bozhevolnyi, S. I., Boltasseva, A., Søndergaard, T., Nikolajsen, T., and Leosson, K. (2005). Photonic bandgap structures for long-range surface plasmon polaritons. *Opt. Commun.*, 250:328–333.
- Bozhevolnyi, S. I. and Søndergaard, T. (2007). General properties of slow-plasmon resonant nanostructures: nano-antennas and resonators. *Optics Express*, 15.
- Bozhevolnyi, S. I., Volkov, V. S., Devaux, E., Laluet, J. Y., and Ebbese, T. W. (2006). Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators. *Nature*, 440:508–511.
- Braitich, R. (2015). Fabricação e caracterização de nanoestruturas metálicas para aplicações em dispositivos plasmônicos. Master's thesis, Universidade de São Paulo.
- Burke, J. J., Stegeman, G. I., and Tamir, T. (1986). Surface-polariton-like waves guided by thin, lossy metal films. *Phys*, 33(8):5186–5201.
- Chang, K. W. and Huang, C. C. (2016). Ultrashort broadband polarization beam splitter based on a combined hybrid plasmonic waveguide. *Nature*.
- Charbonneau, R. (2001). Demonstration of a passive integrated optics technology based on plasmons. Master's thesis, Universidade de Ottawa.

- Charbonneau, R., Lahoud, N., Mattiussi, G., and Berini, P. (2005). Demonstration of a passive integrated optics technology based on plasmons. *Opt. Express*, 13:977–984.
- Charbonneau, R., Scales, C., Breukelaar, I., S. Fafard, N. L., Mattiussi, G., and Berini, P. (2006). Passive integrated optics elements based on longranging surface plasmon polaritons. *J. Lightwave Technol.*, 24:477–494.
- Chen, L., Li, X., and Gao, D. (2012). An efficient directional coupling from dielectric waveguide to hybrid long-range plasmonic waveguide on a silicon platform. *Applied Physics B*, 111:15–19.
- Chen, X., Sandoghdar, V., and Agio, M. (2011). Highly efficient interfacing of guided plasmons and photons in nanowires. *Nano Letters*, 9(11):3756–3761.
- Choi, S. E. and Kim, J. T. (2012). Vertical couplig characteristics between hybrid plasmonic slot waveguide and si waveguide. *Elsevier*.
- da Silva, A. M. P. A. (2011). *Estudo de uma lente plasmônica para acoplamento em nanoestruturas*. PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Engenharia Elétrica.
- da Silva Junior, M. L. C. (2016). *Otimização da Nanoantena plasmônicas para células solares orgânicas*. PhD thesis, Universidade Federal do Pará, Departamento de Engenharia Elétrica.
- Dabby, F. W., Kwstenbaum, A., and Paek, U. C. (1972). Periodic dielectric waveguides. *Optics Communication*.
- Dai, D., Guan, X., and Wu, H. (2014). Integrated circuits with silicon hybrid plasmonic waveguides. *SPIE*.
- de Lima, J. J. I. (2014). *Análise das Características de Propagação de Ondas em Estruturas Periódicas Nanoplasmônicas e Metamateriais*. PhD thesis, Universidade Federal da Bahia.
- de Oliveira, A. J. R. F. (2012). *Análise de dispositivos baseados em guias não convencionais para aplicações em telecomunicações*. Master’s thesis, Universidade Federal da Bahia.
- Degiron, A., Cho, S., Tyler, T., Jokerst, N. M., and Smith, D. R. (2009). Directional coupling between dielectric and long-range plasmon waveguide. *New J. Phys.*, 11.
- Degiron, A., Cho, S. Y., Harrison, C., N. M. Jokerst, C. D., Martin, O. J., and Smith, D. R. (2008). Experimental comparison between conventional and hybrid long-range surface plasmon waveguide bends. *Phys. Rev. A*, 77.
- Delacour, C., S. Blaize, P. G., Fedeli, J. M., Bruyant, R. S. M., Lerondel, G., and A.Chelnokov (2010). Efficient directional coupling between silicon and copper plasmonic nanoslot waveguides: toward metal-oxide-silicon nanophotonics. *Nano Letters*.
- Desiatov, B., Goykhman, I., and Levy, U. (2011). Plasmonic nanofocusing of light in an integrated silicon photonics platform. *Optics Express*.
- Devaux, E., Ebbesen, T. W., Weeber, J., and Dereux, A. (2003). Launching and decoupling surface plasmons via micro-gratings. *Appl. Phys. Lett.*, 83(24):4936.

- Diniz, L. O. (2010). Modelagem de dispositivos em escala nanométrica. Master's thesis, Universidade de São Paulo.
- Du, C. H. and Chiou, Y. P. (2014). Vertical directional couplers with ultra-short coupling length based on hybrid plasmonic waveguides. *Journal of Lightwave Technology*, 32(11).
- Dutta, S., Zografos, O., Gurunaryanan, S., Radu, I., Soree, B., Catthoor, F., and Naeemi, A. (2018). Proposal for nanoscale cascaded plasmonic majority gates for non-boolean computation. *Scientific Reports*.
- Fang, Y. and Sun, M. (2015). Nanoplasmonic waveguides: towards applications in integrated nanophotonic circuits. *Light: Science Applications*, 4:294.
- Fevrier, M., Gogol, P., Aassime, A., R. Megy, C. D., Chelnokov, A., Apuzzo, A., Blaize, S., and Lourtioz, J. M. (2012). Giant coupling effect between metal nanoparticle chain and optical waveguide. *Nano Letters*.
- Gan, F., Sun, C., Li, H., Gong, Q., and Chen, J. (2018). On-chip polarization splitter based on a multimode plasmonic waveguide . *Nano Letters*, 6(1).
- Gan, F., Sun, C., Wang, Y., Li, H., Gong, Q., and Chen, J. (2017). Multimode metallic double-strip waveguides for polarization manipulation. *Adv. Mater. Technol.*, 2.
- Gao, H., Yang, J. C., Lin, J. Y., Stuparu, A. D., Lee, M. H., Mrksich, M., and Odom, T. W. (2010). Broadband plasmonic microlenses based on patches of nanoholes. *Nano Letters*, 10:4111–4116.
- Gather, M. C., Meerholz, K., Danz, N., and Leosson, K. (2010). Net optical gain in a plasmonic waveguide embedded in a fluorescent polymer. *Nature Photon*, 4(7):457–461.
- Gobin, A. M., Lee, M. H., Halas, N. J., James, W. D., Drezek, R. A., and West, J. L. (2007). Fibercoupled dielectric-loaded plasmonic waveguide. *Nano Lett.*, 7(5):1929.
- Gosciniak, J., Volkov, V. S., Bozhevolnyi, S. I., Markey, L., Massenot, S., and Dereux, A. (2010). Fibercoupled dielectric-loaded plasmonic waveguide. *Opt. Express*, 18(5):5314–5319.
- Grandidier, J., S.Massenot, des Francs, G. C., Bouhelier, A., Weeber, J. C., Markey, L., and Dereux, A. (2008). Dielectric-loaded surface plasmon polariton waveguides: Figures of merit and mode characterization by image and fourier plane leakage microscopy. *The American Physical Society*, 78.
- Großa, P., Esmanna, M., Beckera, S. F., Vogelsanga, J., Talebib, N., and Lienau, C. (2016). Plasmonic nanofocusing – grey holes for light. *Light: Science Applications*, 1(2):297–330.
- Hai, Z., Qing, S., Haili, S., and Guanmao, Z. (2015). Study on transmission characteristics of a hybrid triangle wedge surface plasmonic polaritons waveguide with subwavelength mode confinement. *Laser Optoelectronics Progress*, 52.
- He, X., Yang, L., and Yang, T. (2011). Optical nanofocusing by tapering coupled photonic-plasmonic waveguides. *Optics Express*.

- Hentschel, M., Utikal, T., Giessen, H., and Lippitz, M. (2012). Quantitative modeling of the third harmonic emission spectrum of plasmonic nanoantennas. *Nano Letters*, 12:3778–3782.
- Holmgaard, T., Chen, Z., Bozhevolnyi, S. I., Markey, L., and Dereux, A. (2009). Dielectric-loaded plasmonic waveguide-ring resonators. *Optics Express*, 17(4):2968–2975.
- Holmgaard, T., Gosciniak, J., and Bozhevolnyi, S. I. (2010). Long-range dielectric-loaded surface plasmon-polariton waveguides. *Optics Express*, 18(22).
- Homola, J. (2003). Present and future of surface plasmon resonance biosensors. *Analytical Bioanalytical Chemistry*, 377(3):528–539.
- Homola, J. (2008). Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species. *Chem. Rev.*, 108:462–493.
- Homola, J., Yee, S. S., and Gauglitz, G. (2003). Surface plasmon resonance sensors: review. *Sens. Actuators*, 54:3–15.
- Jetté, S. (2003). A study of bragg gratings based on plasmon-polariton wave guides. Master’s thesis, Universidade de Ottawa.
- Jetté-Charbonneau, S., Charbonneau, R., Lahoud, N., Mattiussi, G., and Berini, P. (2005). Bragg gratings based on long-range surface plasmon-polariton waveguides: comparison of theory and experiment. *IEEE J. Quantum Electron.*, 41.
- Johnson, P. B. and Christy, R. W. (1972). Optical constants of the noble metals. *Phys. Rev. B*, 6:4370–4379.
- Jung, J. (2017). Optimal design of plasmonic waveguide with fabrication tolerance. *Optics Communications*, 395:139–146.
- Khurgin, J. B. (2006). Optical isolating action in surface plasmon polaritons. *Appl. Phys. Lett.*, 89.
- Kim, J. T., Ju, J. J., Park, S., Park, S. K., Kim, M. S., Lee, J. M., Choe, J.-S., Lee, M. H., and Shin, S. Y. (2009). Silver stripe optical waveguide for chip-to-chip optical interconnections. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 21:902–904.
- Kim, S. and Qi, M. (2015). Polarization rotation and coupling between silicon waveguide and hybrid plasmonic waveguide. *Optics Express*, 23(8).
- Kong, Y., Chabalko, M., Black, E., Powell, S., Bain, J. A., Schlesinger, T. E., and Luo, Y. (2011). Evanescent coupling between dielectric and plasmonic waveguide for hamr applications. *IEEE Transactions on Magnetics*.
- Konopsky, V. N. and Alieva, E. V. (2006). Long-range propagation of plasmon polaritons in a thin metal film on a one-dimensional photonic crystal surface. *Phys. Rev. Lett.*, 97.
- Konopsky, V. N. and Alieva, E. V. (2009). Long-range plasmons in lossy metal films on photonic crystal surface. *Opt. Lett.*, 34:479–481.

- Lee, J. M., Park, S., Kim, M. S., Park, S. K., Kim, J. T., Choe, J. S., Lee, W. J., Lee, M. H., and Ju, J. J. (2009). Low bending loss metal waveguide embedded in a free-standing multilayered polymer film. *Optics Express*, 17:228–234.
- Liao, C. H. and Shyu, J. S. (2000). Resonance modulations of surface plasmons in arbitrary modified otto and sarid structures. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 39:6334–6338.
- Lin, X. S. and Huang, X. G. (2008). Tooth-shaped plasmonic waveguide filters with nanometric sizes. *Optics Letters*, 33:2874–2876.
- Lindquist, N. C., Johnson, T. W., Nagpal, P., Norris, D. J., and Oh, S. H. (2013). Plasmonic nanofocusing with a metallic pyramid and an integrated c-shaped aperture. *Scientific Reports*, 3.
- Liu, F., Li, Y., Wan, R., Huang, Y., Feng, X., and Zhang, W. (2011). Hybrid coupling between long-range surface plasmon polariton mode and dielectric waveguide mode. *Journal of Lightwave Technology*.
- Liu, F., Rao, Y., Tang, X., Wan, R., Huang, Y., Zhang, W., and Peng, J. (2007a). Hybrid three-arm coupler with long range surface plasmon polariton and dielectric waveguides. *Appl. Phys. Lett.*, 90.
- Liu, F., Rao, Y., Zhang, W., and Peng, J. (2007b). Coupling between long range surface plasmon polariton mode and dielectric waveguide mode. *American Institute of Physics*.
- Liu, Q., Bibbó, L., Albin, S., Wang, Q., Lin, M., Lu, H., and Ouyang, Z. (2018). Plasmonic waveguide design for the enhanced forward stimulated brillouin scattering in diamond. *Scientific Report*, 8.
- Liu, S. and Xiao, M. (2006). Electro-optic switch in ferroelectric thin films mediated by surface plasmons. *Appl. Phys. Lett.*, 88.
- Liu, W., Wang, B., Ke, S., Qin, C., Long, H., Wang, K., and Lu, P. (2016). Enhanced plasmonic nanofocusing of terahertz waves in tapered graphene multilayers. *Journal of Lightwave Technology*, 24(13).
- Luke, K., Okawachi, Y., Lamont, M. R. E., Gaeta, A. L., and Lipson, M. (2015). Broadband mid-infrared frequency comb generation in a si₃n₄ microresonator. *Opt. Lett.*, 40:4823–4826.
- Luo, Y., Chamanzar, M., Apuzzo, A., Salas-Montiel, R., Nguyen, K. N., Blaize, S., and Adibi, A. (2015). On-chip hybrid photonicplasmonic light concentrator for nanofocusing in an integrated silicon photonics platform. *Nano Letters*.
- Magno, G., Fevrier, M., Gogol, P., Aassime, A., Bondi, A., Mégy, R., and Dagens, B. (2017). Strong coupling and vortexes assisted slow light in plasmonic chain-soi waveguide systems. *Scientific Reports*, 7.
- Malitson, I. H. and Dodge, M. J. (1972). Refractive index and birefringence of synthetic sapphire. *J. Opt. Soc. Am.*, 62:1405.
- Marini, A., Conforti, M., Valle, G. D., Lee, H. W., Tran, T. X., Chang, W., Schmidt, M. A., Longhi, S., Russel, P. S. J., and Biancalana, F. (2013). Ultrafast nonlinear dynamics of surface plasmon polaritons in gold nanowires due to the intrinsic nonlinearity of metals. *New Journal of Physics*.

- Matsuzakiand, Y., Okamoto, T., Haraguchi, M., Fukui, M., and Nakagaki, M. (2008). Characteristics of gap plasmon waveguide with stub structures. *Optics Express*, 16:16314–16325.
- Nesterov, M. L., Kats, A. V., and Turitsyn, S. K. (2008). Extremely short-length surface plasmon resonance devices. *Optics Express*, 16(25):20227–20240.
- Noriega, R. E. R. (2012). Estudo de guias periodicamente segmentados usando o método dos elementos finitos. Master’s thesis, Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Elétrica e de Computação.
- Novotny, L. and Hecht, B. (2006). *Principles of Nano-Optics*. Cambridge University.
- Otto, A. (1968). Excitation of nonradiative surface plasmonwaves in silver by method of frustrated total reflection. *Z. Phys.*, 216(4):398–410.
- Panchenko, E., Cadusch, J. J., Avayu, O., Ellenbogen, T., James, T. D., Gómez, D., and Roberts, A. (2018). In-plane detection of guided surface plasmons for high-speed optoelectronic integrated circuits. *Adv. Mater. Technol.*, 3.
- Park, H. (2015). Study of surface plasmon resonance in metal and alloy nanofilms using maxwell description and metamaterial simulation in comsol. Master’s thesis, Rose-Hulman Institute of Technology.
- Peng, S. T., Tamir, T., and Bertoni, H. L. (1975). Theory of periodic dielectric waveguides. *IEEE Transactions On Microwave Theory and Techniques*, 23(1):123.
- Rubio-Mercedes, C. E., Rodriguez-Esquerre, V. F., Frasson, A. M. F., and Hernández-Figueroa, H. E. (2009). Fem approach for the analysis of cylindrically symmetric photonic devices. *Journal of Lightwave*, 27(21):4717–4721.
- Sarid, D. (1984). Enhanced surface-magnetoplasma interactions in a semiconductor. *Phys. Rev. B*, 29:2344–2346.
- Sepúlveda, B., Lechuga, L. M., and Armelles, G. (2006). Magneto optic effects in surface-plasmon-polaritons slab waveguides. *J. Lightwave Technol.*, 24:945–955.
- Silva, A. O. (2016). Modelação de efeitos plasmônicos em um metamaterial nanoestruturado para aplicação em sensoriamento óptico. Master’s thesis, Universidade Federal do Pará.
- Sisnando, A. D. (2011). Análise e síntese de dispositivos fotônicos utilizando redes neurais artificiais. Master’s thesis, Universidade Federal da Bahia, Departamento de Engenharia Elétrica.
- Sisnando, A. D. (2015). *Otimização de Dispositivos Fotônicos Utilizando algoritmos bio-inspirados*. PhD thesis, Universidade Federal da Bahia, Departamento de Engenharia Elétrica.
- Smith, C. L. C., Stenger, N., Kristensen, A., Mortensen, N. A., and Bozhevolnyi, S. I. (2015). Gap and channeled plasmons in tapered grooves: a review. *Nanoscale*, 7:9355–9386.
- Stegeman, G. I., Wallis, R. F., and Maradudin, A. A. (1983). Excitation of surface polaritons by end-fire coupling. *Nanoscale*, 8(7):386–388.

- Stoll, H. and Yariv, A. (1973). Coupled-mode analysis of periodic dielectric waveguides. *Optics Communication*.
- Sturlesi, B., Grajower, M., Mazurski, N., and Levy, U. (2018). Integrated amorphous silicon-aluminum long-range surface plasmon polariton (lr-spp) waveguides. *Apl Photonics*, 3.
- Summers, J. A. and Ram, R. J. (2011). Thermal and optical characterization of resonant coupling between surface plasmon polariton and semiconductor waveguides. *Applied Physics Letters*, 99.
- Takahara, J., Yamagishi, S., Taki, H., Morimoto, A., and Kobayashi, T. (1997). Guiding of a one-dimensional optical beam with nanometer diameter. *Optics Letters*.
- Tao, J., Huang, X. G., Lin, X. S., Zhang, Q., and Jin, X. P. (2009). A narrow-band subwavelength plasmonic waveguide filter with asymmetric multiple-teeth-shaped structure. *Optics Express*, 17:13989–13994.
- Tellez-Limon, R., Bahari, B., Hsu, L., Park, J. H., Kodigala, A., Tuniz, A., and Schmidt, M. A. (2016). Broadband efficient directional coupling to short-range plasmons: towards hybrid fiber nanotips. *Optics Express*.
- Tong, X. C. (2018). *Functional Metamaterials and Metadevices*. Springer.
- Tuniz, A., Jain, C., Weidlich, S., and Schmidt, M. A. (2016). Broadband azimuthal polarization conversion using gold nanowire enhanced step-index fiber. *Optics Letters*, 41(3):448–451.
- Tuniz, A. and Schmidt, M. A. (2016). Broadband efficient directional coupling to short-range plasmons: towards hybrid fiber nanotips. *Optics Express*.
- Verhagen, E., Kuipers, L. K., and Polman, A. (2010). Plasmonic nanofocusing in a dielectric wedge. *Nanoletters*.
- Verhagen, E., Polman, A., and Kuipers, L. K. (2008). Nanofocusing in laterally tapered plasmonic waveguides. *Optics Express*, 16(1).
- Vitrant, G., Zaiba, S., Vineeth, B. Y., Kouriba, T., Ziane, O., Stephan, O., Bosson, J., and Baldeck, P. L. (2008). Obstructive micro diffracting structures as an alternative to plasmonics nano slits for making efficient microlenses. *Optics Express*, 2012(24).
- Volkov, V. S., Bozhevolnyi, S. I., Devaux, E., Laluet, J. Y., and Ebbese, T. W. (2007). Wavelength selective nanophotonic components utilizing channel plasmon polaritons. *Nanoletters*, 7(4):880–884.
- Wang, Z., Wang, J., Zhai, Y., Lu, Y., and Sun, X. (2017). Low-loss and wide-band polarization converter based on a hybrid plasmonic waveguide with symmetric ag strips. *Optics Communications*, 403:234–239.
- Wieduwilt, T., Tuniz, A., Linzen, S., Goerke, S., Dellith, J., Hubner, U., and Schmidt, M. A. (2015). Ultrathin niobium nanofilms on fiber optical tapers – a new route towards low-loss hybrid plasmonic modes. *Scientific Reports*, 5.
- Wu, Z., Haus, J. W., and Nelson, R. L. (2008a). Plasmonic notch filter design based on long-range surface plasmon excitation along metal grating. *Plasmonics*, 3:103–108.

- Wu, Z., Nelson, R. L., Haus, J. W., and Zhan, Q. (2008b). Plasmonic electro-optic modulator design using a resonant metal grating. *Opt. Lett.*, 33:551–553.
- Yamazaki, T., Yamauchi, J., and Nakano, H. (2007). A branch-type te/tm wave splitter using a light-guiding metal line. *Journal of Lightwave Technology*, 25(3):922–928.
- Zhang, B., Bian, Y., Ren, L., Guo, F., Tang, S. Y., Mao, Z., Liu, X., Sun, J., Gong, J., Guo, X., and Huang, T. J. (2017). Hybrid dielectric-loaded nanoridge plasmonic waveguide for lowloss light transmission at the subwavelength scale. *Scientific Reports*.
- Zhang, Q., Huang, X. G., Lin, X. S., Tao, J., and Jin, X. P. (2009). A subwavelength coupler-type mim optical filter. *Optics Express*, 17.

Apêndice A

Apêndice - Publicações

A.1 Artigos Publicados Relacionados ao Projeto

A pesquisa realizada neste trabalho de mestrado possibilitou a publicação em congresso internacional.

A.1.1 Publicação em Congresso Internacional

- SPIE 2017 (San Diego, USA)

Título do artigo: Design of dielectric to plasmonic waveguide power transfer couplers

Autores: Emanuela Paranhos Lima*, Vitaly Felix Rodriguez Esquerre*, C. E. Rubio-Mercedes⁺ and A. Dourado-Sisnando*

* Universidade Federal da Bahia. ⁺ Universidade do Mato Grosso do Sul

- XIX International Conference on Nanoscience and Nanotechnology (Veneza, Itália)

Título do artigo: Numerical Analysis and Design of Dielectric to Plasmonic Waveguides Couplers

Autores: Emanuela Paranhos Lima*, Vitaly Felix Rodriguez Esquerre*.

* Universidade Federal da Bahia.

Apêndice B

Apêndice

B.1 Índice de Refração

Quando o sinal óptico atravessa um meio, parte dele será sempre atenuado. Dessa maneira, deve-se considerar um índice de refração complexo dado por $n + jk$. A parte real n é o índice de refração e indica a velocidade da fase, enquanto a parte imaginária k é chamada de coeficiente de extinção e indica a quantidade de atenuação quando a onda eletromagnética se propaga através do material.

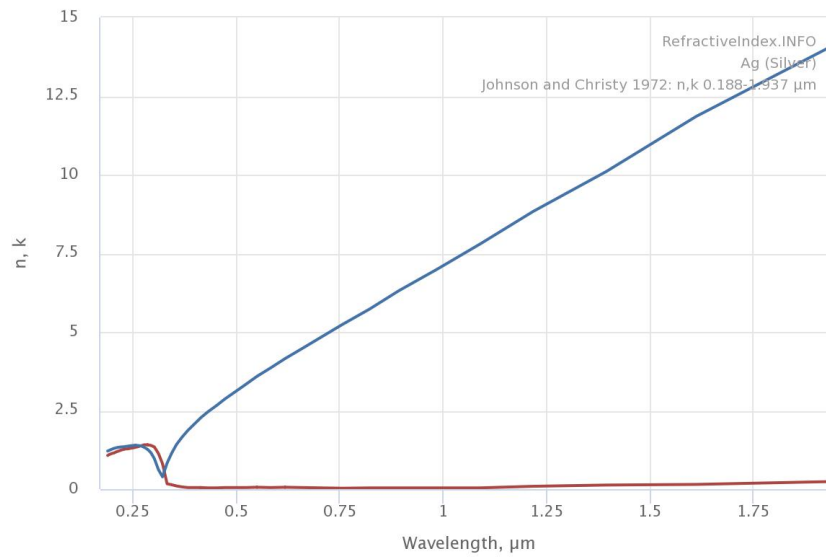


Figura B.1: Índice de refração versus comprimento de onda da Prata segundo Johnson and Christy. Em azul, parte imaginária k e em vermelho, parte real n . (Johnson and Christy, 1972)

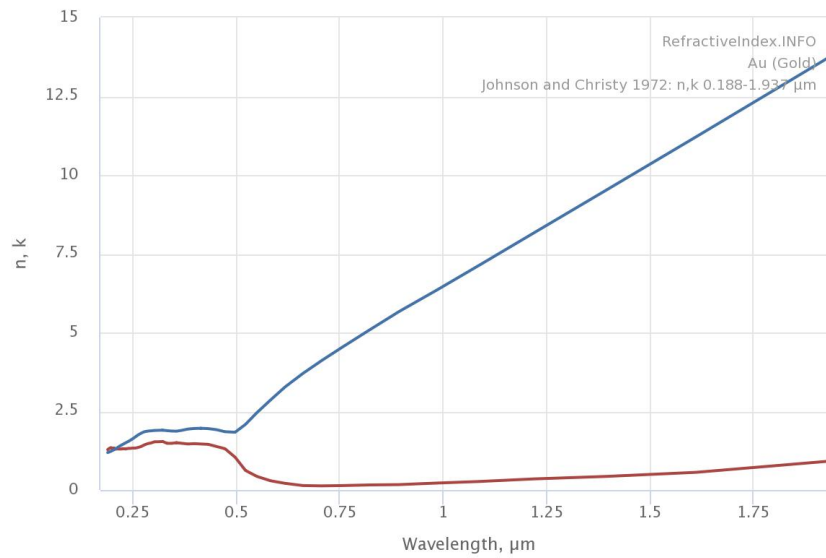


Figura B.2: Índice de refração versus comprimento de onda do Ouro segundo Johnson and Christy. Em azul, parte imaginária k e em vermelho, parte real n . (Johnson and Christy, 1972)

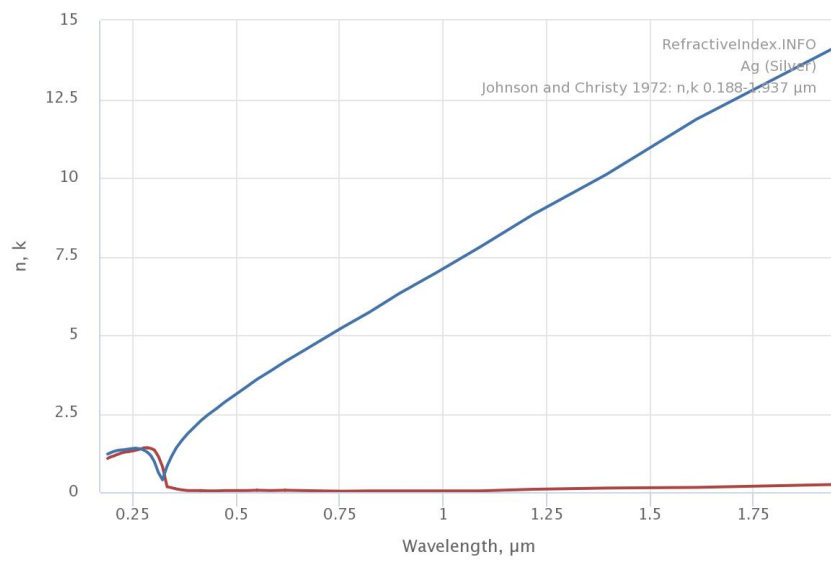


Figura B.3: Índice de refração versus comprimento de onda do Cobre segundo Johnson and Christy. Em azul, parte imaginária k e em vermelho, parte real n . (Johnson and Christy, 1972)