

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria delle Telecomunicazioni
Dipartimento di Elettronica, Informazione e Bioingegneria



Antenne in grafene per la banda di frequenze dei THz

Relatore: Prof. Gian Guido GENTILI

Tesi di Laurea di:
Andrea MACCARINI
Matricola: 770537

Anno Accademico 2013-2014

A mamma e papà

Sommario

L'oggetto di questa tesi è lo studio di nano-antenne in grafene operanti nella banda di frequenze dei THz. Il contesto di applicazione è quello di sistemi di comunicazione wireless in nano-sistemi.

Si descrivono le proprietà elettroniche del grafene. Si ricava che quest'ultimo è modellizzato tramite la conducibilità superficiale mediante la formula di Kubo. Tale conducibilità può essere controllata dinamicamente per mezzo di un campo elettrico applicato. In questo modo si possono progettare antenne riconfigurabili in frequenza oppure antenne riconfigurabili nel fascio di radiazione (in ricezione e trasmissione), a frequenza fissata.

Si descrive lo stato dell'arte reperibile dalla bibliografia su queste tipologie di antenne.

Infine si riportano le geometrie e i risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche, effettuate tramite il software commerciale Feko, nelle seguenti configurazioni: patch a dipolo e patch ad anello a singolo e doppio strato di grafene.

Ebbene anche questo capitolo, della mia vita è giunto al termine. Un capitolo che senza l'aiuto, l'appoggio, il sostegno e il conforto delle persone a me vicine non si sarebbe mai realizzato. Perciò i ringraziamenti, che sembrano una parte banale e scontata di una tesi, non lo sono affatto.

Ringrazio il relatore di questa tesi, il prof. Gian Guido Gentili, senza il quale non avrei ottenuto i risultati descritti in questo lavoro.

Il ringraziamento più "corposo" va alla mia famiglia, in particolare a mamma Claudia e papà Luciano, senza i quali non sarei potuto diventare quello che sono. Loro mi hanno trasmesso l'educazione e i valori dell'impegno e del sacrificio. Loro mi hanno sostenuto economicamente e moralmente, guidandomi nelle decisioni giuste, ma lasciandomi sempre la libertà di scelta. Loro hanno sempre creduto in me, nei momenti buoni e in quelli difficili. Per questo dedico a loro questa tesi, pur sembrando banale, ma dell'idea che non c'è niente di meno banale al mondo dell'amore incondizionato che una madre e un padre provano per il loro figlio.

Ringrazio i miei coinquilini storici, quelli con la C maiuscola: Claudio detto la Faina e Mattia detto il Moro. Con loro posso dire di aver vissuto e non convissuto. In un certo senso sono stati come dei fratelli e insieme ci siamo divertiti molto, seppur con qualche momento di divergenza. Probabilmente le nostre strade si divideranno, come già successo in parte, ma spero di non perdere mai i contatti con questi due strani elementi.

Ringrazio i miei compagni di università Valentina, Jacopo, Mattia, Gloria, Alessandro e tutti gli altri. Con loro ho condiviso le gioie e i dolori del Politecnico di Milano; è anche grazie a loro e al loro aiuto, morale e tecnico, che oggi sono qui a scrivere questi ringraziamenti.

Ringrazio la mia ragazza Federica, che negli ultimi due anni mi è stata accanto e mi ha aiutato molto in quei momenti di sconforto, soprattutto in fase di stesura di questa tesi, dove il tempo era il mio peggiore nemico.

Ringrazio tutti i colleghi del NM.MA/NO.WS di Telecom Italia, a partire dal mio tutor Domenico, con i quali ho condiviso le mattinate degli ultimi 16 mesi; sempre gentili e disponibili nei miei confronti.

Ringrazio tutte le persone che, in modo diretto o indiretto, mi hanno permesso di raggiungere questo traguardo.

- Grazie a tutti -

Indice

Elenco delle figure	VII
Elenco delle tabelle	XI
Introduzione	1
1 Il Grafene	5
1.1 Dal carbonio al grafene	5
1.1.1 Forme allotropiche	7
1.1.2 La scoperta	8
1.1.3 Tecniche di sintesi	9
1.2 Proprietà elettroniche e fisiche	10
1.2.1 Struttura elettronica a bande dei materiali comuni . . .	11
1.2.2 Struttura elettronica del grafene	12
1.3 Conducibilità superficiale	14
1.3.1 Bias elettrico	17
1.3.2 Bias magnetico	17
1.3.3 Surface Plasmon Polaritons (SPP)	17
1.4 Applicazioni del grafene	21
1.4.1 Graphene-enable Wireless Communications (GWC)	22
2 Stato dell'arte delle antenne in grafene	24
2.1 Antenna patch a dipolo	25
2.2 Antenna reflectarray	31
2.3 Antenna leaky-wave	36

3	Simulazioni di antenne patch in grafene	40
3.1	Antenna patch a dipolo	42
3.1.1	Antenna patch a dipolo: singolo strato di grafene . . .	42
3.1.2	Antenna patch a dipolo: doppio strato di grafene . . .	48
3.2	Antenna patch ad anello	54
3.2.1	Antenna patch ad anello: singolo strato di grafene . . .	54
3.2.2	Antenna patch ad anello: doppio strato di grafene . . .	57
	Conclusioni	65
	A Software di simulazione: Feko	68
	Bibliografia	72

Elenco delle figure

1.1	Forme allotropiche del carbonio: fullereni, nanotubi, grafite. . .	8
1.2	Struttura elettronica a bande dei metalli, semiconduttori e isolanti a confronto.	12
1.3	Effetto ambipolare del campo elettrico nel grafene.	13
1.4	Conducibilità superficiale del grafene per $\mu_c = 0eV, T = 300^\circ K, \tau = 1ps$: parte reale (linea rossa) e parte immaginaria (linea blu tratteggiata)	15
1.5	Parte reale e immaginaria dell'impedenza superficiale del grafene per $\mu_c = 0eV, T = 300K, \tau = 1ps$	16
1.6	Legame tra potenziale chimico μ_c e campo elettrico applicato V_0	18
1.7	Parte reale e immaginaria della costante di propagazione (normalizzata) dell'onda superficiale SPP TM, calcolata per $\mu_c = 0eV, T = 300^\circ K, \tau = 1ps$	20
1.8	Rappresentazione schematica di un 16-core GWC-on-Chip. . .	23
2.1	Antenna patch a dipolo. (a) Top view. (b) Cross section della configurazione a singolo strato. (c) Cross section della configurazione a doppio strato (slotted).	26
2.2	Modello a linea di trasmissione qualitativo dell'antenna patch a dipolo. Z_{IN} impedenza d'ingresso, γ costante di propagazione del modo, Z_G impedenza associata al modo, Z_p impedenza interna della sorgente.	27
2.3	Impedenza d'ingresso e efficienza totale di radiazione nel modello a singolo e doppio strato, in funzione della frequenza e di μ_c	29

2.4	Antenna patch ibrida grafene-metallo. (a) Top view. (b) Cross section.	30
2.5	Impedenza d'ingresso e efficienza totale di radiazione del dipolo ibrido grafene-metallo, in funzione della frequenza e di μ_c	30
2.6	Antenna reflectarray. (a) Concetto generale. (b) Cella elementare a base di grafene.	32
2.7	Antenna reflectarray: sfasamento dell'onda riflessa introdotto da patch quadrate di differenti dimensioni in funzione di μ_c a frequenza 1.3 THz.	33
2.8	Antenna reflectarray: coefficiente di riflessione della cella elementare di dimensione $10\mu m$ in funzione della frequenza al variare di μ_c . (a) Fase e (b) ampiezza.	34
2.9	Circuito equivalente della cella elementare reflectarray.	35
2.10	Antenna leaky-wave con modulazione sinusoidale.	37
2.11	Antenna leaky-wave: rappresentazione schematica della relazione tra tensione applicata alle varie porte V_{DC} e reattanza X_S	37
2.12	Antenna leaky-wave: angolo di radiazione θ_0 in funzione del periodo p . N è il numero di porte che definiscono un periodo di modulazione p	39
2.13	Antenna leaky-wave: pattern di radiazione nel piano ZY per differenti valori di N . La linea continua rappresenta i risultati simulati mentre quella tratteggiata quelli teorici.	39
3.1	Schema del dipolo a singolo strato di grafene. (a) Vista frontale. (b) Vista laterale.	43
3.2	Parte reale e immaginaria dell'impedenza d'ingresso vista alla porta di alimentazione dell'antenna a dipolo a singolo strato, calcolata per $\mu_c = 0$ e $\mu_c = 0.2$	44
3.3	Guadagno dell'antenna a dipolo a singolo strato nel piano ZX , calcolato per $\mu_c = 0$, $f = 0.49THz$, e $\mu_c = 0.2$, $f = 1.19THz$	45
3.4	Diagramma di radiazione 3D (guadagno) dell'antenna a dipolo a singolo strato, calcolata per $\mu_c = 0.2$, $f = 1.19THz$	46

3.5	Corrente superficiale in quadratura dell'antenna a dipolo a singolo strato, calcolata per $\mu_c = 0.2, f = 1.19THz$	47
3.6	Rappresentazione schematica dell'antenna a dipolo a doppio strato (vista laterale).	48
3.7	Parte reale e immaginaria dell'impedenza d'ingresso vista alla porta di alimentazione dell'antenna a dipolo a doppio strato, calcolata per $\mu_c = 0, \mu_c = 0.1$ e $\mu_c = 0.2$	50
3.8	Guadagno dell'antenna a dipolo a doppio strato nel piano ZX , calcolato per $\mu_c = 0, f = 0.9THz, \mu_c = 0.1, f = 1.4THz$ e $\mu_c = 0.2, f = 1.98THz$	51
3.9	Diagramma di radiazione 3D (guadagno) dell'antenna a dipolo a doppio strato, calcolata per $\mu_c = 0.2, f = 1.98THz$	52
3.10	Corrente superficiale in quadratura dell'antenna a dipolo a doppio strato, calcolata per $\mu_c = 0.2, f = 1.98THz$	53
3.11	Antenna ad anello: vista frontale.	54
3.12	Parte reale e immaginaria dell'impedenza d'ingresso vista alla porta di alimentazione dell'antenna ad anello a singolo strato, calcolata per $\mu_c = 0$ e $\mu_c = 0.2$	55
3.13	Guadagno in funzione della frequenza dell'antenna ad anello a singolo strato, calcolata per $\mu_c = 0, \mu_c = 0.2$ e $\theta = 180^\circ$	56
3.14	Rappresentazione schematica della geometria dell'antenna ad anello a doppio strato di grafene.	57
3.15	Impedenza d'ingresso nell'anello a doppio strato in funzione della frequenza, al variare di μ_c e del posizionamento della porta d'ingresso.	59
3.16	Guadagno nel piano ZX dell'antenna ad anello a doppio strato. Configurazioni con alimentazione in alto e in basso. f_1 e f_2 sono le due frequenze di risonanza che si ottengono nella configurazione con alimentazione in alto.	61
3.17	Guadagno 3D dell'antenna ad anello a doppio strato nella configurazione a.	62
3.18	Corrente superficiale in quadratura nell'antenna ad anello a doppio strato, calcolata per $\mu_c = 0$	63

A.1	Feko: creazione della struttura e applicazione del substrato. . .	70
A.2	Feko: creazione del foglio d'impedenza, applicazione del ma- teriale alla struttura e richiesta degli output.	71

Elenco delle tabelle

2.1	Parametri di simulazione antenna patch.	28
2.2	Parametri usati nell'antenna leaky-mode.	38
3.1	Dimensioni e parametri usati nelle simulazioni.	64
3.2	Risultati simulazioni. Alimentazione in basso ¹ , alimentazione in alto ²	64

Introduzione

Ormai è evidente che nanotecnologia è la parola chiave che aprirà la strada a tutte le tecnologie che cambieranno le nostre vite e il mondo in cui viviamo, nel corso dei prossimi decenni. Questa rivoluzione è già iniziata, anche se per ora resta strettamente confinata alle università e ai centri di ricerca.

Risulta impossibile parlare di grafene senza parlare di nanotecnologia. Il grafene è un materiale di spessore monoatomico formato da atomi di carbonio ed è il materiale più sottile scoperto e sintetizzato dall'uomo, fin'ora.

Nel 2004 i due scienziati russi Andre Geim e Kostantin Novoselov dell'Università di Manchester scoprirono il grafene e successivamente, nel 2010, vinsero il premio Nobel per la fisica. Da allora il grafene ha mostrato in laboratorio potenzialità sorprendenti tanto da guadagnarsi l'appellativo di "materiale delle meraviglie", per il quale la UE ha stanziato un miliardo di euro per svilupparne la ricerca nei prossimi 10 anni.

Il grafene è il materiale più sottile ed è tra i più leggeri che esistono; è incredibilmente denso, trasparente, resistente allo stress (1.000 volte più dell'acciaio), efficiente come conduttore di calore ed elettricità, resistente alla temperatura e alle variazioni del pH. Dato le sue enormi potenzialità, alcuni colossi dell'elettronica, come IBM, Samsung, Sandisk, Xerox, si stanno già dando battaglia a colpi di brevetti, oltre che alle università asiatiche e americane.

Uno dei campi che potrebbe maggiormente beneficiare dall'applicazione del grafene è quello delle tecnologie verdi. Con i nanotubi sarà possibile creare transistor dotati di una vasta superficie e di una bassissima resistenza elettrica, oppure sviluppare materiali resistentissimi e allo stesso tempo leggerissimi, ideali per l'industria aeronautica o per produrre pale eoliche più efficienti.

Introduzione

Usando il grafene come elettrodo su strutture composte da nanotubi e buckyballs si potranno realizzare pannelli solari interamente in carbonio (eliminando i metalli), più efficienti e facili da riciclare. Le auto a idrogeno potranno avere serbatoi più piccoli, ma in grado di contenere maggiori quantità di carburante e saranno più piccole ma anche più efficienti.

Il settore che per primo vedrà le applicazioni commerciali del grafene sarà l'Information Technology (IT). Il grafene, infatti, può essere utilizzato per sostituire gli elettrodi in indio negli schermi OLED (i display sottilissimi di prossima generazione), rendendoli - alla lunga - meno costosi da produrre. Anche il segmento mobile potrà beneficiare dall'utilizzo del grafene attraverso batterie agli ioni di litio in grado di ricaricarsi molto più rapidamente e, più avanti, attraverso sistemi energetici interamente in grafene.

Sfruttando alcune particolarità del materiale - come ad esempio il fatto che alcune particolari molecole sensibili a certe malattie si attaccano agli atomi di carbonio - sarà poi possibile usarlo anche in campo medico, per creare nuovi strumenti di diagnostica.

Un progetto più concreto, già brevettato da Lockheed Martin, è l'utilizzo di grandi strati di grafene, per desalinizzare l'acqua marina in maniera estremamente efficiente e con un dispendio minimo di energia.

Tuttavia, oggi, lo sviluppo del grafene si scontra con le dure leggi economiche. Infatti il costo per la produzione di un chilogrammo di grafene si aggira sui 30-35.000 euro.

L'oggetto di questa tesi è lo studio di nano-antenne in grafene nella banda inferiore dell'infrarosso (terahertz). La ricerca sviluppata in questo lavoro si propone di dare un contributo allo studio di questa particolare applicazione del grafene che fin'ora non è stata presa molto in considerazione dalla comunità scientifica. Il contesto di applicazione è quello delle comunicazioni wireless in nano-sistemi.

Come si vedrà nei capitoli successivi, strutture di dimensioni nell'ordine dei $10\mu m$ possono essere usate come antenne, in una banda di frequenze intorno ad $1THz$. È facile dedurre che la teoria classica delle antenne a microonde, che lega dimensione e frequenza di risonanza, non vale in questo contesto. Infatti $1THz$ equivale (in spazio libero), in lunghezza d'onda, a $300\mu m$. Questa

condizione significa che, come primo vantaggio, il grafene permette di ottenere antenne con dimensioni notevolmente inferiori (circa un fattore 100) rispetto alla controparte metallica, a parità di frequenza. Come seconda peculiarità è possibile modificare la conducibilità del grafene in modo dinamico, applicando un campo elettrico alla struttura. In questo modo si ottengono antenne riconfigurabili dinamicamente in frequenza oppure, usando strutture ad array o leaky-wave, riconfigurabili nel fascio di radiazione in trasmissione e ricezione, a frequenza fissata.

Questi risultati sono frutto delle particolari proprietà elettroniche del grafene per le quali si sviluppa la propagazione di modi superficiali plasmonici, chiamati *Surface Plasmon Polaritons* (SPP).

Nel Capitolo 1 si descrive il materiale grafene. La descrizione parte dal carbonio e dalle forme allotropiche che può assumere, per poi parlare della scoperta del grafene e delle tecniche di sintesi. Si descrivono le proprietà elettroniche e la struttura elettronica del grafene, confrontandola con quella dei materiali comuni, come metalli, semiconduttori e isolanti. Si descrive il modello matematico della conducibilità superficiale del grafene e l'effetto che un campo elettrico o magnetico ha su di essa. Viene data una descrizione dei modi SPP, che si propagano nel materiale. Infine si descrivono alcune possibili applicazioni del grafene.

Nel Capitolo 2 è presentato lo stato dell'arte delle antenne in grafene. Si ripercorre lo studio bibliografico che è alla base di questa tesi, il quale fornisce una presentazione su come tale tipologia di antenna funziona. Si descrivono tre tipologie d'antenna, che corrispondono a tre principi di funzionamento: patch a dipolo, reflectarray, leaky-wave. Dato che la ricerca sulle antenne in grafene è abbastanza recente, non esiste una letteratura vasta e articolata sull'argomento.

Il Capitolo 3 è la parte centrale di questa tesi. In esso si descrivono le simulazioni numeriche eseguite su varie geometrie e configurazioni di antenne in grafene. Si descrivono tali geometrie e se ne analizzano i risultati ottenuti, confrontandoli, dove possibile, con quelli riportati in letteratura. Le

Introduzione

simulazioni sono state eseguite con un software commerciale di simulazione elettromagnetica: Feko. Le strutture simulate sono: antenna patch a dipolo e antenna patch ad anello, nelle configurazioni a singolo e doppio strato di grafene.

In Appendice A si descrivono in modo sintetico, ma guidato, i passi necessari per creare e simulare una geometria in Feko. Inoltre si da una descrizione qualitativa del metodo numerico implementato nel software, chiamato MoM (Method of Moments).

Capitolo 1

Il Grafene

Grafene è il nome che viene dato ad uno strato monoatomico (2D) formato da atomi di carbonio, disposti come un reticolo a nido d'ape. In altre parole è la versione bidimensionale della grafite.

A cosa serve il Grafene? “Non lo so. É come presentare un pezzo di plastica a un uomo di un secolo fa e chiedergli cosa ci si può fare. Un po' di tutto, penso” - Andre Geim premio Nobel per la Fisica 2010.

1.1 Dal carbonio al grafene

Il carbonio è certamente il più versatile tra gli elementi chimici, in quanto è in grado di formare una grande varietà di molecole, i cosiddetti composti organici, in numero di gran lunga superiore a quello tutti i composti formati dagli altri elementi. É sicuramente uno dei più affascinanti e costituisce il componente strutturale essenziale delle più complesse molecole biologiche, dalle vitamine, agli enzimi, dagli ormoni alle grandi macromolecole come il DNA. Questo comportamento è dovuto alle sue piccole dimensioni atomiche, alla sua elettronegatività intermedia, a suoi quattro orbitali di legame in grado di formare legami con geometrie spaziali diverse, ed alla sua capacità a stabilire legami chimici di tipo diverso sia con altri atomi di carbonio sia con altri elementi per formare catene lineari, ramificate, aperte o chiuse ad anello in una grande varietà di combinazioni.

1.1. Dal carbonio al grafene

Il carbonio è presente in natura in forme cristalline diverse dette allotropiche. Gli allotropi hanno differenti arrangiamenti di legame tra gli atomi, e possiedono quindi differenti proprietà chimiche e fisiche. La più comune struttura di carbonio è quella propria della mina di una matita: la grafite. Essa è costituita da strati planari di atomi di carbonio formanti un reticolo a maglie esagonali in cui ogni atomo di carbonio è legato ad altri tre. Un cristallo di grafite è costituito da questi strati di atomi di carbonio impilati parallelamente tra loro legati da deboli forze intermolecolari. Sotto alte pressioni la grafite può trasformarsi in diamante, che è una forma metastabile del carbonio. Nel diamante gli atomi di carbonio sono legati l'uno all'altro mediante legami covalenti che formano una struttura tetraedrica. Il reticolo tridimensionale del cristallo è rigidamente interconnesso.

Il modo come gli atomi sono legati l'uno all'altro nei materiali solidi ha un forte impatto sulle proprietà complessive. La struttura del diamante, formata da energici legami tra atomi di carbonio, lo rende molto resistente alla deformazione e perciò estremamente duro, mentre i legami C-C presenti nelle strutture esagonali della grafite sono forti, ma i diversi strati sono solo debolmente legati tra loro da forze del tipo Van der Waals (con energie di circa $2eV/nm^2$), che rendono la grafite facilmente sfaldabile in direzione parallela al piano cristallino applicando sforzi di taglio contenuti (dell'ordine dei $300nN/mm^2$).

Si pensava, fino a pochi anni fa, che non fosse possibile isolare un singolo piano di grafite, in una forma tale da poter effettuare misure di tipo elettrico. Nel 2004, i fisici Konstantin Novoselov e Andre Geim mostrarono che un singolo strato poteva essere isolato e trasferito su un altro substrato e che era possibile effettuare una caratterizzazione elettrica. Il singolo strato di carbonio è chiamato grafene.

Tra le proprietà più caratteristiche del monostrato atomico vi è la possibilità di osservarlo con l'ausilio del solo microscopio ottico. L'analisi ottica si rivela il primo e più potente mezzo di riconoscimento del grafene a cui è possibile far seguire altre tecniche di visualizzazione, come la microscopia a forza atomica (AFM) o la microscopia a scansione elettronica (SEM) o a trasmissione (TEM).

Il grafene, essendo un singolo strato di atomi di carbonio, è il primo vero

1.1. Dal carbonio al grafene

materiale bidimensionale cristallino ed è rappresentativo di una intera classe di nuovi materiali 2D che includono, ad esempio, anche strati di Boro e Azoto (BN), molibdeno-Zolfo (MoS₂) che sono stati prodotti dopo il 2004.

1.1.1 Forme allotropiche

Il grafene può essere considerato come la struttura di base per la costruzione di tutti gli altri materiali grafiteici noti, che costituiscono le forme allotropiche del carbonio.

Il carbonio presenta le seguenti forme allotropiche standard (figura 1.1):

- **Grafite:** struttura cristallina 3D con strati (legati debolmente tra loro da forze di Van der Waals) di molecole esagonali legate tra loro sul piano. Ogni atomo è legato ad altri tre in un piano composto da anelli esagonali fusi assieme.
- **Carbonio amorfo:** : grafite che non mantiene la macrostruttura cristallina, ma si presenta sotto forma di polvere.
- **Fullereni:** presentano una struttura simile alla grafite, ma contengono formazioni pentagonali (o eptagonali) di atomi di carbonio, che piegano i fogli in sfere, ellissi o cilindri.
- **Diamante:** struttura 3D basata su un reticolo tetraedrico dove ogni atomo è legato ad altri quattro. Molto resistente allo sfregamento.

Quanti strati monoatomici sono necessari per considerare una struttura come 3D? Nel caso del graphene si dimostra che, siccome la struttura elettronica evolve rapidamente con il numero di layer, il confine tra grafene (2D) e grafite (3D) è 10 layers.

Nel caso di graphene a singolo e doppio strato, la struttura assume uno spettro elettronico abbastanza semplice, in cui entrambi sono considerati semiconduttori a zero-gap.

Nel caso di un numero di layer maggiore o uguale a 3, la situazione è decisamente più complessa: compaiono diversi portatori di carica e le bande di conduzione e valenza iniziano a sovrapporsi.

1.1. Dal carbonio al grafene

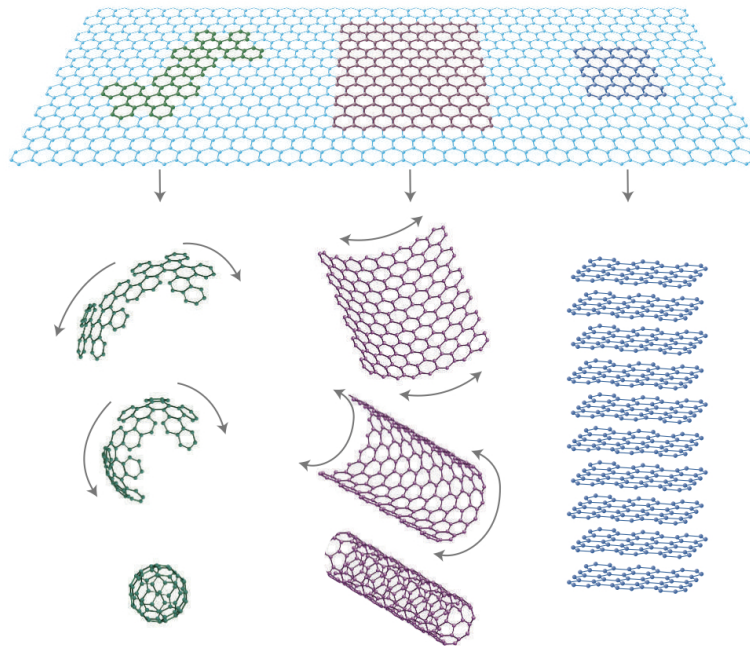


Figura 1.1: Forme allotropiche del carbonio: fullereni, nanotubi, grafite.

1.1.2 La scoperta

Più di 70 anni fa venne teorizzata l'idea che materiali cristallini prettamente bidimensionali non potevano esistere in natura, a causa della loro instabilità termodinamica. Infatti il punto di fusione di strati sottili decresce con il diminuire dello spessore e il materiale diventa instabile quando assume uno spessore inferiore a qualche dozzina di layer atomici. Per questo motivo, layer monoatomici erano considerati solamente una parte integrale di strutture 3D, composte da un substrato monocristallino, sopra il quale lo strato monoatomico veniva appoggiato, in modo che i reticoli coincidessero. Senza questa base 3D, materiali 2D a se stanti non sarebbero potuti esistere.

Nel 2004, gli scienziati A. K. Geim e K. S. Novoselov scoprirono sperimentalmente il graphene (premio Nobel per la fisica nel 2010). L'isolamento di fogli di grafene fu ottenuto in una maniera poco elaborata, mediante un metodo di esfoliazione meccanica divenuta nota come il metodo "scotch-tape". Infatti, fu usato del nastro adesivo per staccare frammenti di grafite da un cristallo. Ripetendo l'operazione molte volte sugli stessi frammenti si riuscì

1.1. Dal carbonio al grafene

ad ottenere strati sottilissimi, poi trasferiti su un substrato di silice (SiO_2). Questa scoperta si riconcilia alla teoria pensando che tale struttura 2D cristallina viene temprata in un stato metastabile, essendo stata estratta da un materiale 3D. In altre parole, i cristalli 2D estratti diventano intrinsecamente stabili tramite un graduale accorciamento della terza dimensione.

1.1.3 Tecniche di sintesi

Sono state sviluppate varie tecniche di produzione del grafene, ma al momento non c'è nessun metodo efficace e poco costoso per ottenere grandi fogli di grafene.

L'esfoliazione meccanica, a tutt'oggi, è il metodo più semplice e accessibile per isolare fiocchi di grafene della dimensione di alcuni micron quadri, anche se non può essere applicata ad una produzione di tipo industriale.

Un secondo tipo di approccio alla preparazione del grafene è l'esfoliazione per via chimica. Si parte in questo caso dall'ossido di grafite (GO). L'ossido ha una struttura stratificata come quella della grafite e presenta atomi di carbonio legati con ossigeno sotto forma di idrossili o di carbonili. Confrontando l'ossido con il grafene, aumenta la distanza tra i piani e il cristallo è fortemente idrofilo. Mediante l'azione di ultrasuoni si provoca l'inserimento di molecole d'acqua tra i piani e conseguentemente una esfoliazione del materiale in strati monoatomici di ossido di grafite. L'ossido di grafene è però un materiale isolante e pertanto i legami con l'ossigeno devono essere scissi e il carbonio ridotto per ottenere il grafene. Si possono ricavare in questo modo dei fogli di grafene in sospensione liquida, uniti poi in un foglio più grande spruzzando il liquido su un supporto. In questo processo lo stadio critico è la riduzione dei fiocchi di GO in grafene attraverso l'esposizione del GO all'idrazina. Questa riduzione ha diverse limitazioni per la produzione a larga scala, in particolare a causa dei vapori di idrazina altamente tossici.

Un ulteriore metodo è la crescita per deposizione su substrato CVD (Chemical Vapour Deposition), in cui, in generale, si sottopone il substrato ad atmosfera controllata, sotto particolari condizioni di pressione e temperatura. Si utilizzano diversi substrati policristallini, che svolgono il ruolo di

1.2. Proprietà elettroniche e fisiche

catalizzatori per la crescita.

Un altro approccio è la decomposizione termica del carburo di silicio, tramite il riscaldamento in atmosfera controllata, oppure l'unzipping di nanotubi, come fogli di grafene arrotolati.

Una tecnica di produzione innovativa, è quella recentemente sviluppata da ricercatori giapponesi i quali, utilizzando specifici batteri sono riusciti ad ottenere la riduzione di ossido di grafene.

Concludendo, si può dire che l'esfoliazione meccanica è il metodo più indicato per la produzione di grafene di alta qualità e per lo studio del materiale, non richiede un alto costo e particolari dispositivi. Tuttavia, ad oggi, la produzione tramite CVD e grafene ossidato (GO) è quella maggiormente usata per la produzione su larga scala, con un breve tempo di produzione e buone proprietà del grafene prodotto.

1.2 Proprietà elettroniche e fisiche

Non è scopo di questo elaborato entrare nei dettagli della fisica dello stato solido. Ci limiteremo, quindi, a descrivere sinteticamente e qualitativamente le caratteristiche elettriche del materiale, che ci permetteranno di capire i risultati sulla conducibilità superficiale discussi nel capitolo successivo.

Il grafene è estremamente resistente e rigido (100 volte più dell'acciaio), trasparente e flessibile. Inoltre presenta, a temperatura ambiente, una conducibilità elettrica superiore a qualunque altra sostanza.

Le proprietà del grafene dipendono dal fatto che il carbonio ha quattro elettroni di cui tre impegnati (ibridazione sp^2) nei legami planari che rendono possibile la struttura bidimensionale. Il quarto elettrone, presente nell'orbitale p che si estende verticalmente rispetto agli altri, è in grado di muoversi attraverso lunghe distanze nel grafene quasi liberamente. La capacità di conduzione elettrica del grafene è superiore dalle 10 alle 100 volte quella dei conduttori tradizionali, in cui gli elettroni collidendo con gli atomi dissipano la propria energia come calore. La descrizione quantistica degli elettroni di conduzione interagenti con il potenziale del grafene avviene attraverso un gas di elettroni (quasi particelle) privi di massa a riposo. Quindi, grazie alle

1.2. Proprietà elettroniche e fisiche

le sue proprietà elettriche, le applicazioni più promettenti del grafene sono legate all'elettronica, vista la combinazione nello stesso materiale delle caratteristiche richieste al conduttore ideale, come il più basso valore di resistività ($\sim 10^{-8}\Omega m$), l'elevata densità di corrente che vi può fluire ($> 108A/cm^2$), l'alto valore di conducibilità termica ($600Wm^{-1}K^{-1}$).

1.2.1 Struttura elettronica a bande dei materiali comuni

Nella fisica dello stato solido la struttura elettronica a bande (o più semplicemente struttura a bande) di un solido descrive la gamma di energie che ad un elettrone di un certo materiale è "consentito" o "proibito" possedere.

Gli elettroni in un solido allo stato fondamentale e a temperatura 0 kelvin, in obbedienza alla loro natura fermionica e al principio di Pauli, che preclude ai fermioni il fatto di potersi trovare in due nello stesso stato, riempiono gli stati elettronici loro consentiti partendo dal livello energetico più basso via via su, fino a che tutti gli elettroni del solido hanno trovato un'accomodazione. Si distribuiscono cioè rispettando la distribuzione di Fermi-Dirac calcolata a temperatura 0 kelvin. Nei metalli, il livello energetico più alto occupato si definisce energia di Fermi. A questo punto possono verificarsi diverse possibilità, come mostrato in figura 1.2:

- Vi è una banda, o più di una, fra le ultime riempite da elettroni, che è parzialmente riempita e restano degli stati vuoti. In tal caso si ha a che fare con un metallo, cioè un sistema in cui gli ultimi elettroni hanno la possibilità di spostarsi in livelli energetici molto vicini, infinitesimalmente più alti in energia, e dunque hanno la possibilità di una mobilità elevata che porta il sistema a essere un buon conduttore di elettricità.
- L'ultima banda è stata riempita completamente in modo tale che il prossimo stato elettronico consentito si trova sulla banda successiva e fra questa banda e la banda completamente riempita c'è una banda proibita (band gap) di energie. In tal caso il solido è un isolante.

1.2. Proprietà elettroniche e fisiche

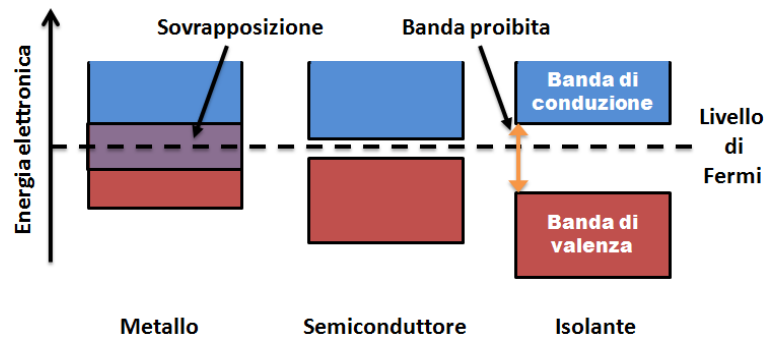


Figura 1.2: Struttura elettronica a bande dei metalli, semiconduttori e isolanti a confronto.

- Si parla infine di semiconduttore nel caso di un isolante in cui la banda proibita è talmente piccola che a temperatura ambiente c'è una certa probabilità che gli elettroni si trovino a saltare la banda proibita per agitazione termica, e dunque il sistema si trovi in una situazione prossima a quella di un metallo, con valori di conducibilità elettrica non nulli.

1.2.2 Struttura elettronica del grafene

L'eccezionale qualità elettronica del grafene è indotta dal cosiddetto trasporto balistico che, a sua volta, è causa dell'elevata mobilità elettronica. Tale fenomeno è prodotto dalla particolare natura dei portatori di carica, il cui comportamento, eccezionale rispetto ad altri materiali, segue la legge delle particelle relativistiche e viene descritto dall'equazione di Dirac. Sebbene non ci sia niente di relativistico rispetto all'andamento degli elettroni attorno agli atomi di carbonio, la loro interazione con il potenziale periodico del reticolo a nido d'ape del grafene dà origine a nuove quasi-particelle che, a basse energie E , sono accuratamente descritte dall'equazione di Dirac di dimensione $(2 + 1)$ con una velocità della luce effettiva $v_f \approx 10^6 m^{-1} s^{-1}$, detta velocità di Fermi. Queste quasi-particelle, chiamate fermioni di Dirac, possono essere viste come elettroni che hanno perso la loro massa o come neutrini che hanno acquisito una carica elettronica e . In altre parole, si può affermare che i

1.2. Proprietà elettroniche e fisiche

portatori di carica possono viaggiare per migliaia di distanze interatomiche senza scatterare.

La caratteristica fondamentale del grafene è il suo marcato effetto ambipolare di campo elettrico e la struttura elettronica a zero-gap, ossia un band-gap nullo tra banda di conduzione e banda di valenza, come mostrato in figura 1.3. Lo spettro conico a bassa energia $E(k)$ mostra che al variare della tensione applicata, varia la posizione dell'energia di Fermi. V_g positivi (negativi) inducono concentrazione di elettroni (lacune) tali per cui $n = \alpha * V_g$. La rapida attenuazione della resistività ρ indica l'alta mobilità μ . Quantitativamente si parla di $\mu = 15000 - 100000 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ in base alla purezza del materiale e alla densità di carica indotta.

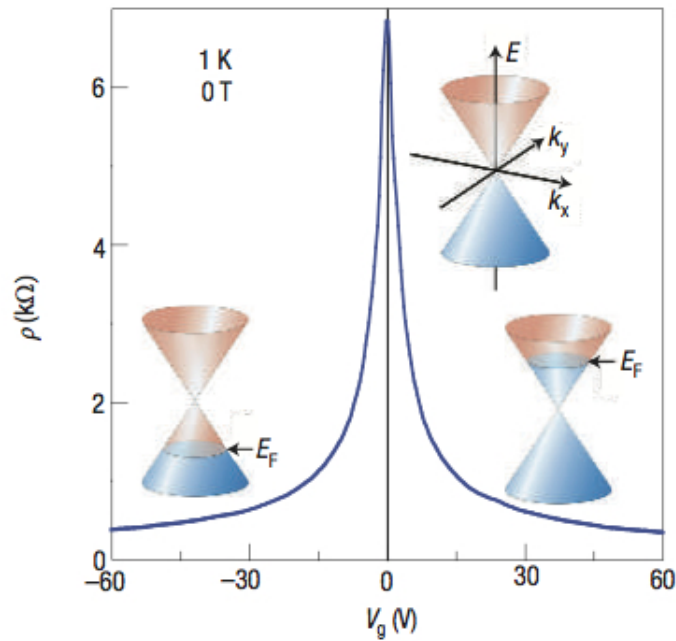


Figura 1.3: Effetto ambipolare del campo elettrico nel grafene.

1.3 Conducibilità superficiale

Un singolo strato di grafene infinito può essere modellizzato come una superficie equivalente con conducibilità superficiale $\sigma = \sigma' + j\sigma''$. Tale conducibilità superficiale, in assenza di campi elettrici o magnetici, considerando il materiale isotropo, è integralmente descritta dalla formula di Kubo:

$$\sigma(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = \frac{jq_e^2(\omega - j2T)}{\pi\hbar} \cdot \left[\frac{1}{(\omega - j2T)^2} \int_0^\infty \epsilon \left(\frac{\partial f_d(\epsilon)}{\partial \epsilon} - \frac{\partial f_d(-\epsilon)}{\partial \epsilon} \right) \partial \epsilon - \int_0^\infty \frac{f_d(\epsilon) - f_d(-\epsilon)}{(\omega - j2T)^2 - 4(\epsilon/\hbar^2)} \partial \epsilon \right] \quad (1.1)$$

dove ω è la pulsazione, $\Gamma = 1/(2\tau)$ lo scattering rate, ϵ l'energia, T la temperatura, $-q_e$ la carica dell'elettrone, h la costante di Planck e $f_d(\epsilon)$ la distribuzione di Fermi-Dirac, tale per cui

$$f_d(\epsilon) = \left(e^{(\epsilon - |\mu_c|)/K_b T} + 1 \right)^{-1} \quad (1.2)$$

essendo μ_c il *potenziale chimico* e K_b la costante di Boltzmann.

Nella banda dei terahertz, per frequenze minori di 5 THz e a temperatura ambiente, è possibile descrivere la conducibilità superficiale del grafene approssimando la formula di Kubo. Si considera solamente il contributo intrabanda, trascurando quello interbanda. Tale approssimazione sarà utilizzata per calcolare la conducibilità in tutto il resto di questo elaborato e vale

$$\sigma = -j \frac{q_e^2 K_b T}{\pi \hbar^2 (\omega - j2\Gamma)} \left[\frac{\mu_c}{K_b T} + 2 \ln \left(e^{-\frac{\mu_c}{K_b T}} + 1 \right) \right]. \quad (1.3)$$

In figura 1.4 è rappresentata la conducibilità superficiale del materiale, come parte reale e parte immaginaria. Dal grafico si evince che per alte frequenze la parte immaginaria σ'' domina rispetto a quella reale σ' .

L'impedenza superficiale $Z = \frac{1}{\sigma} = R + jX$, invece presenta una parte reale costante in frequenza ed una parte immaginaria lineare, come mostrato in figura 1.5.

1.3. Conducibilità superficiale

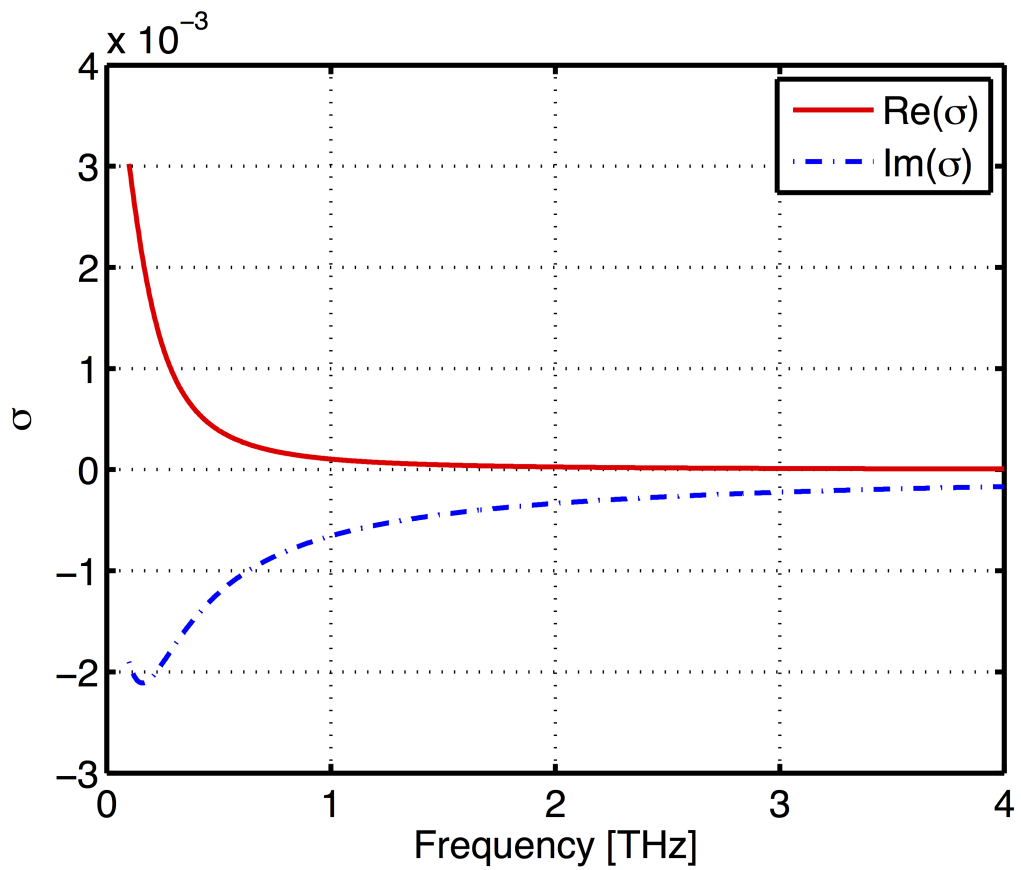


Figura 1.4: Conducibilità superficiale del grafene per $\mu_c = 0\text{eV}$, $T = 300^\circ\text{K}$, $\tau = 1\text{ps}$: parte reale (linea rossa) e parte immaginaria (linea blu tratteggiata)

1.3. Conducibilità superficiale

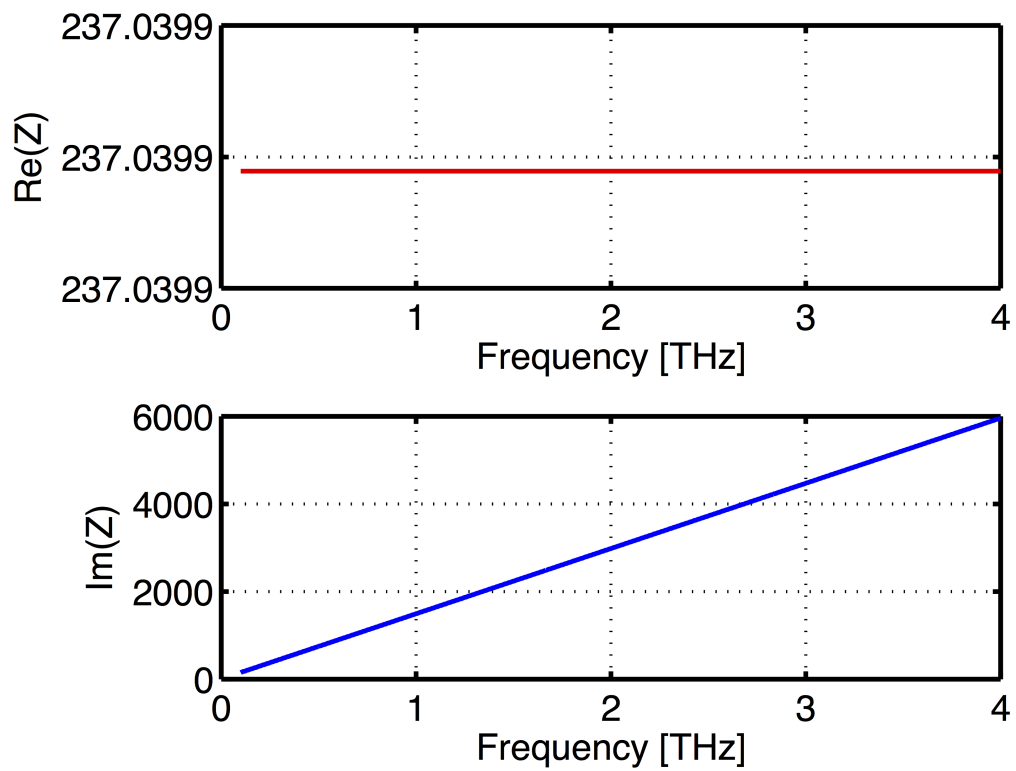


Figura 1.5: Parte reale e immaginaria dell'impedenza superficiale del grafene per $\mu_c = 0eV, T = 300K, \tau = 1ps$.

1.3. Conducibilità superficiale

1.3.1 Bias elettrico

Il potenziale chimico è un parametro di fondamentale importanza nello studio e progettazione dei dispositivi in grafene. Esso è strettamente legato alla densità di carica

$$n_s = \frac{2}{\pi \hbar v_f^2} \int_0^\infty \epsilon [f_d(\epsilon - \mu_c) - f_d(\epsilon + \mu_c)] \partial \epsilon, \quad (1.4)$$

dove v_f è la velocità di Fermi ($\sim 10^8 \text{ cm/s}$ nel grafene) [2].

Il risultato mostrato dalla 1.3 è molto interessante poichè lega direttamente la densità di carica superficiale del materiale al potenziale chimico. Agendo su quest'ultimo, applicando, per esempio, un campo elettrostatico, ossia una tensione applicata V_{bias} , è possibile modificare la conducibilità del grafene. Questo fenomeno viene comunemente definito *biasing elettrico* ed è il principio chiave per cui è possibile realizzare dispositivi elettronici in grafene, riconfigurabili dinamicamente. In figura 1.6 viene mostrato l'andamento del potenziale chimico μ_c in funzione del campo elettrico applicato V_0 , o viceversa.

1.3.2 Bias magnetico

In presenza di un campo magnetico il grafene perde la condizione di isotropia. In altri termini un bias magnetico permette di controllare dinamicamente l'anisotropia del grafene. La conducibilità superficiale assume una forma tensoriale, per cui

$$\bar{\sigma}(\omega, \mu_c, \Gamma, T, \vec{B}_o) = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_d & \sigma_0 \\ -\sigma_0 & \sigma_d \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

dove σ_d e σ_0 sono le due componenti della conducibilità tensoriale, chiamate diretta e di Hall, rispettivamente, le quali possono essere ottenute dall'equazione di Kubo [2], [3].

1.3.3 Surface Plasmon Polaritons (SPP)

Come mostrato in figura 1.4, il comportamento del grafene è dominato da una reattanza di tipo induttivo, la quale permette le adeguate condizioni

1.3. Conducibilità superficiale

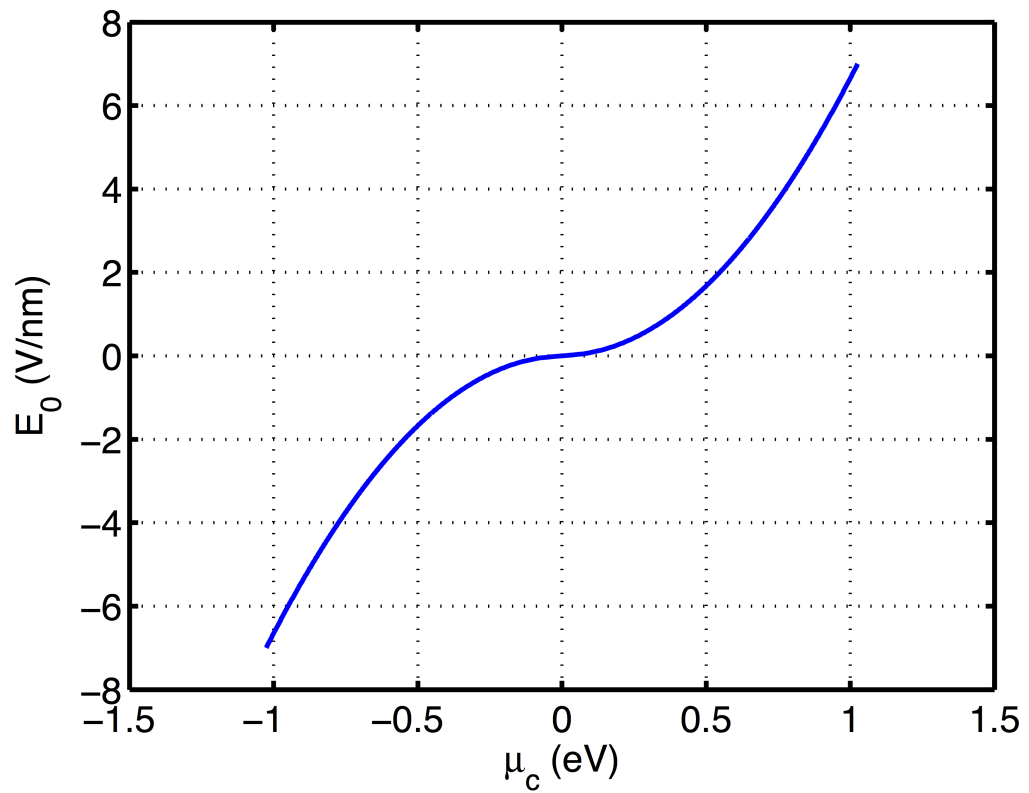


Figura 1.6: Legame tra potenziale chimico μ_c e campo elettrico applicato V_0

1.3. Conducibilità superficiale

per l'esistenza e la propagazione degli *surface plasmon polaritons (SPP)*. Gli SPP sono modi superficiali di propagazione TM. Il tuning della conducibilità influisce sulle proprietà elettromagnetiche della superficie del grafene e quindi sui modi SPP TM di propagazione. La costante di propagazione di questi modi, influenzati dalla (1.3), può essere approssimata come

$$k_{SPP} = k_0 \sqrt{1 - \left(\frac{2}{\sigma\eta_0}\right)^2}, \quad (1.6)$$

dove k_0 e η_0 sono il numero d'onda del vuoto e l'impedenza caratteristica del vuoto, rispettivamente. In figura 1.7 viene mostrato l'andamento della costante di propagazione $k_{SPP} = k'_{SPP} + jk''_{SPP}$, normalizzata per k_0 , in funzione della frequenza. La normalizzazione è necessaria per capire le proprietà dell'onda superficiale rispetto alla sua controparte nel vuoto; in particolar modo si evince che ad alte frequenze la parte reale del rapporto k_{SPP}/k_0 aumenta mentre la parte immaginaria cambia solo leggermente. Questo implica la generazione di onde superficiali più lente all'aumentare della frequenza, mentre le perdite sulla superficie del grafene rimangono praticamente costanti su tutto lo spettro (considerando basse energie). La lunghezza d'onda dell'onda superficiale è data da

$$\lambda_{SPP} = \frac{2\pi}{k'_{SPP}}. \quad (1.7)$$

Le dimensioni dell'antenna saranno, quindi, paragonabili a λ_{SPP} ; questo comporta, a parità di frequenza, una notevole riduzione delle dimensioni delle antenne in grafene rispetto a quelle in metallo di circa un fattore 100.

Si ricorda che le considerazioni fatte fin'ora sono valide per un singolo strato infinito di grafene, nel vuoto. Nel caso in cui tale strato fosse supportato da altri materiali, in genere chiamati substrati, la (1.6) diventa

$$\frac{\epsilon_{r1}}{\sqrt{k_{SPP}^2 - \epsilon_{r1}k_0^2}} + \frac{\epsilon_{r2}}{\sqrt{k_{SPP}^2 - \epsilon_{r2}k_0^2}} = j \frac{\sigma\eta_0}{k_0}, \quad (1.8)$$

dove ϵ_{r1} e ϵ_{r2} sono le costanti dielettriche relative dei materiali circostanti, mentre la (1.7) rimane valida.

1.3. Conducibilità superficiale

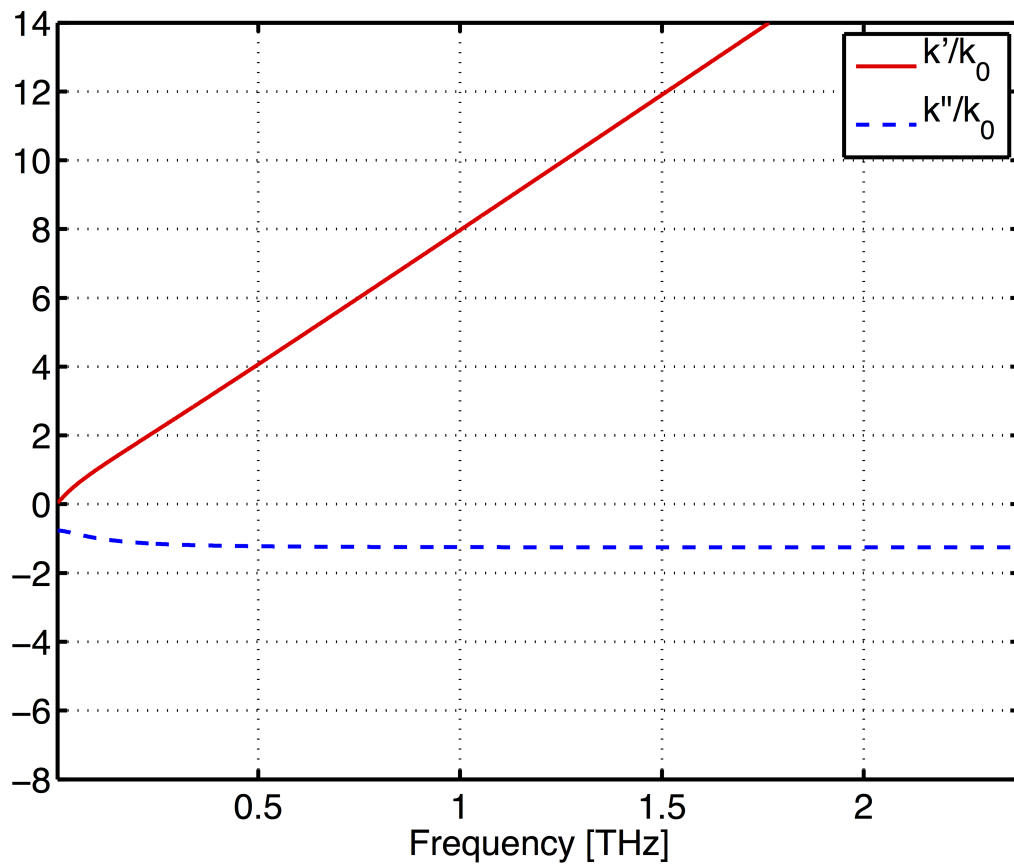


Figura 1.7: Parte reale e immaginaria della costante di propagazione (normalizzata) dell'onda superficiale SPP TM, calcolata per $\mu_c = 0eV$, $T = 300^\circ K$, $\tau = 1ps$.

1.4 Applicazioni del grafene

Il grafene presenta proprietà chimico-fisiche eccezionali che lo rendono interessante in un gran numero di potenziali applicazioni.

Il grafene è praticamente trasparente non solo alla luce visibile, ma anche all'infrarosso e all'ultravioletto (la trasmissione ottica è circa il 98 % della luce incidente), quindi potrebbe essere molto adatto per la produzione di touch screen stampabili su fogli di plastica invece che di vetro, pannelli solari e celle solari sostituendo quindi i più fragili e costosi ossidi di Indio-Stagno. Molti esperti ritengono che proprio i touch-screen saranno i primi prodotti in grafene ad essere immessi nel mercato. Nuovi tipi di pannelli solari attualmente in sviluppo consistono di celle fotovoltaiche inserite tra due strati di grafene. La luce attraversa gli strati di grafene e colpisce la cellula fotovoltaica, con il risultato di generare elettricità che è poi trasportata dal grafene.

Anche le materie plastiche mostrano straordinari miglioramenti di diverse proprietà come la conducibilità elettrica, la stabilità termica il modulo elastico o la resistenza alla trazione, in seguito all'inserimento nella matrice polimerica di grafene o altre nano strutture basate sul grafene. Ad esempio, caricando una resina epossidica con solo una quantità dello 0,125% in massa di grafene, la tenacità alla frattura aumenta del 65% (rispetto a 0,5% di nanotubi di carbonio o 15% di riempitivi convenzionali tipo SiO_2). Un'interessante applicazione del grafene è la sua capacità di agire come condensatore per accumulare energia elettrica prodotta da celle solari. Questi supercondensatori basati su grafene mostrano una densità di energia specifica di $85,6Wh/kg$ a temperatura ambiente e $136Wh/kg$ a $80^\circ C$, che è simile a quella delle batterie nichel-idruri metallici. La principale differenza è che i supercondensatori possono essere riutilizzati un numero indefinito di volte e possono essere caricati e scaricati in maniera estremamente veloce. Numerosi sono anche gli studi che riguardano l'impiego del grafene per lo stoccaggio d'idrogeno nelle celle a combustibile. Simulazioni indicano che quando uno strato di grafene viene compresso lateralmente formando ondulazioni con creste e valli, l'idrogeno aderisce chimicamente alle creste delle onde. L'idrogeno ha una forte affinità per le zone convesse del grafene e molto poca per quelle concave e ciò accade perchè l'energia del legame è proporzionale alla curvatura del re-

1.4. Applicazioni del grafene

ticolo atomico. Invertendo successivamente la curvatura del grafene diventa possibile rilasciare l'idrogeno.

Le molecole di gas che si depositano sul grafene alterano le sue proprietà elettroniche in maniera misurabile. Questo permette di creare sensori basati sul grafene in grado di analizzare la presenza di gas nocivi (NO_2 , NH_3 , CO) e di vapore acqueo H_2O . Gli studi preliminari danno indicazioni molto incoraggianti sia in termini di risposta che in termini di selettività del sensore.

Recenti ricerche hanno mostrato che la particolare struttura molecolare del grafene consente di creare dei fori di qualsiasi dimensione sulla sua superficie, realizzando una sorta di setaccio molecolare. Questo permette di utilizzare il grafene nel processo di desalinizzazione dell'acqua. Infatti il grafene, grazie alle dimensioni dei suoi fori è in grado di impedire il passaggio delle molecole di $NaCl$, lasciando invece passare le molecole d'acqua. Nelle simulazioni realizzate, il grafene nanoporoso si è dimostrato essere in grado di ottenere la desalinizzazione dell'acqua marina con un metodo centinaia di volte più efficiente delle tradizionali tecniche di osmosi inversa e ad un costo energetico molto basso. Questi ultimi sistemi richiedono una pressione elevatissima – e quindi un alto consumo di energia – per forzare l'acqua attraverso membrane che sono circa un migliaio di volte più spesse del grafene. Al contrario con un foglio di grafene si potrebbe operare a pressioni molto più basse e purificare l'acqua ad un costo inferiore.

Uno degli ostacoli che è necessario superare affinché il grafene non rimanga un materiale utilizzabile in poche applicazioni nel mondo reale, è riuscire a produrre fogli di grafene sufficientemente grandi per essere utili.

É probabile che saranno necessari anni prima di vedere le possibili applicazioni del grafene realizzate; la scoperta di questo materiale delle “meraviglie” ha fornito opportunità senza precedenti per indagare queste possibilità.

1.4.1 Graphene-enable Wireless Communications (GWC)

Nelle telecomunicazioni, un'importante e promettente applicazione del grafene è la cosiddetta Graphene-enable Wireless Communications (GWC) [1],[4].

1.4. Applicazioni del grafene

GWC richiama l'uso di nano-antenne plasmoniche a base di grafene, chiamate anche *graphennas*, il cui effetto plasmonico permette di irradiare onde elettro-magnetiche nella banda di frequenze dei THz (0.1 - 10 THz). Tali nano-antenne, di dimensioni micrometriche, non sarebbero realizzabili con materiali metallici tradizionali. Lo scenario tipico di applicazione è la comunicazione wireless on-chip e off-chip nei sistemi di processamento delle informazioni, affetti, come ben noto, da problemi di scala ed energia delle interconnessioni elettriche[5].

I vantaggi di applicare GWC nelle comunicazioni on-chip e off-chip sono essenzialmente due. Da una parte la radiazione nelle frequenze dei THz comporta una enorme banda di trasmissione e quindi capacità trasmissive ad altissimi bit rate ed allo stesso tempo permette di ottenere architetture a bassissimo impatto energetico e a bassa complessità. Dall'altro lato, la ridotta dimensioni di tali antenne, rispetto alla loro controparte metallica, permette una migliore ottimizzazione dello spazio, che può essere critica in questo scenario.

In figura 1.8 è mostrato un esempio di architettura GWC-on-chip, in un sistema multi-core. Il bus di comunicazione tra i 16-core del processore è ottenuto tramite collegamenti wireless, per mezzo delle singole antenne installate in ogni core.

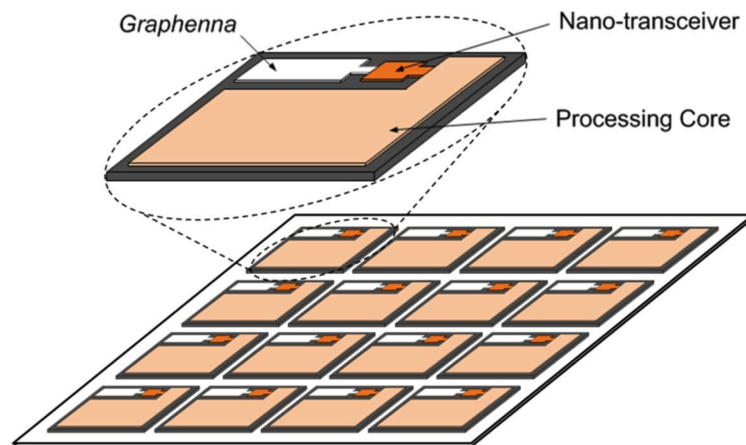


Figura 1.8: Rappresentazione schematica di un 16-core GWC-on-Chip.

Capitolo 2

Stato dell'arte delle antenne in grafene

In questo capitolo sono illustrati i modelli di antenne in grafene proposti in letteratura. Lo scopo è quello di fornire al lettore una panoramica dello stato dell'arte di antenne in grafene, operanti nella banda di frequenze dei terahertz (0.1 - 4 THz).

Anche se il grafene sta attraendo, a livello mondiale, molto interesse nella comunità scientifica, la bibliografia sulle antenne composte da questo materiale, di recente scoperta, non è affatto vasta. La scelta dei modelli riportati di seguito è basata, principalmente, su tre criteri : riproducibilità della struttura fisica, riconfigurabilità dinamica, tramite bias elettrico, e buone caratteristiche di propagazione elettro-magnetica contestuali agli scopi. La selezione bibliografica proposta in questo capitolo è orientata alla discussione di tre tipologie di antenna, le quali, secondo gli studi bibliografici effettuati, rappresentano essenzialmente le tre categorie di antenne in grafene che è possibile reperire in letteratura. Non è scopo di questo elaborato fornire una trattazione completa dei dispositivi e/o delle antenne in grafene, ma descrivere quei modelli che potrebbero, in un futuro recente, diventare parte della tecnologia realizzativa effettiva.

Come già descritto nel capitolo precedente le dimensioni geometriche sono nell'ordine dei micron. Lo studio del funzionamento di questi device è rappresentato in termini di impedenza d'ingresso, guadagno, direttività, efficienza

2.1. Antenna patch a dipolo

di radiazione, che corrispondono ai parametri caratteristici della teoria classica delle antenne.

I modelli proposti, che in generale possono essere definiti antenne patch, hanno quattro caratteristiche comuni:

- uno strato di grafene (patch);
- Un substrato su cui viene appoggiata la patch di grafene e che ne influenza le caratteristiche propagative;
- Un meccanismo che applica una differenza di potenziale V_{bias} per controllare dinamicamente la conducibilità superficiale.

In sintesi, di seguito riportiamo la trattazione delle seguenti tipologie di antenna patch:

- *antenna a dipolo*,
- *antenna reflectarrays*,
- *antenna leaky-wave*.

2.1 Antenna patch a dipolo

Nel 2013 M. Tamagnone et al. propongono un modello formato da uno strato di grafene in configurazione a dipolo, appoggiato sopra un substrato dielettrico di GaAs (arseniuro di gallio). Il layer è separato al centro, formando un gap, nel quale è disposta l'alimentazione. Tale geometria è mostrata in figura 2.1 (a) e (b). Nello stesso articolo, gli autori propongono e confrontano con la struttura precedentemente citata, un'antenna uguale alla precedente, ma con un doppio strato di grafene (slotted). I due strati di grafene sono separati da un sottile strato dielettrico di ossido di alluminio, detto allumina (Al_2O_3) [6], come mostrato in figura 2.1 (c).

La seconda struttura permette ai due layer di grafene impilati di auto-influenzarsi. In altre parole si crea una differenza di potenziale che, secondo il principio di funzionamento di un condensatore a facce piane parallele, crea un campo elettro-statico perpendicolare alla superficie del grafene. Tramite

2.1. Antenna patch a dipolo

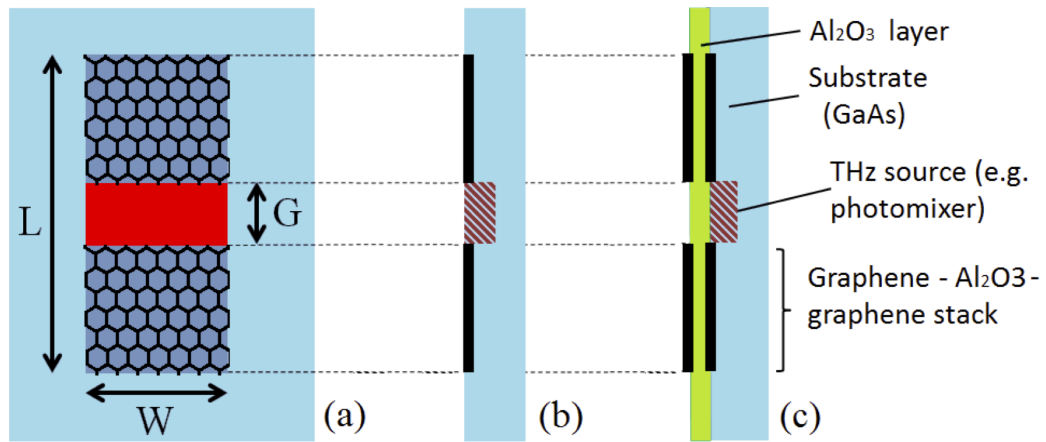


Figura 2.1: Antenna patch a dipolo. (a) Top view. (b) Cross section della configurazione a singolo strato. (c) Cross section della configurazione a doppio strato (slotted).

l'alimentazione si controlla l'effetto di campo elettrico tra le facce, in altri termini, si controlla la densità di elettroni e lacune sulla superficie, rappresentata dal potenziale chimico μ_c e perciò la conducibilità superficiale della struttura. La struttura complessiva a doppio layer, si comporta come una a singolo layer a conducibilità doppia; essendo σ_1 la conducibilità del modello a singolo strato e σ_2 quella del modello a doppio strato, risulta che $\sigma_2 \approx 2\sigma_1$. Le correnti superficiali associate al modo di propagazione del grafene sono parallele ad L . Questo fatto ha due conseguenze: primo, la corrente generata dalla sorgente nella banda dei THz permette di eccitare contemporaneamente i modi plasmonici su entrambe le patch di grafene (quelle coplanari si intende), secondo, le estremità della struttura equivalgono ad un circuito aperto, che riflettono verso la sorgente i modo plasmonici. Queste considerazioni qualitative permettono di proporre il modello a linea di trasmissione, mostrato in figura 2.2.

Le dimensioni proposte sono identiche per entrambe le strutture e valgono $22\mu m \times 7\mu m \times 2\mu m (L \times W \times G)$. La distanza tra le due facce di grafene, nella versione slotted è $100nm$, che equivale allo spessore dell'isolante a base di allumina. Dimensioni e parametri di simulazione sono riassunti in tabella 2.1 mentre i risultati ottenuti sono mostrati in figura 2.3.

2.1. Antenna patch a dipolo

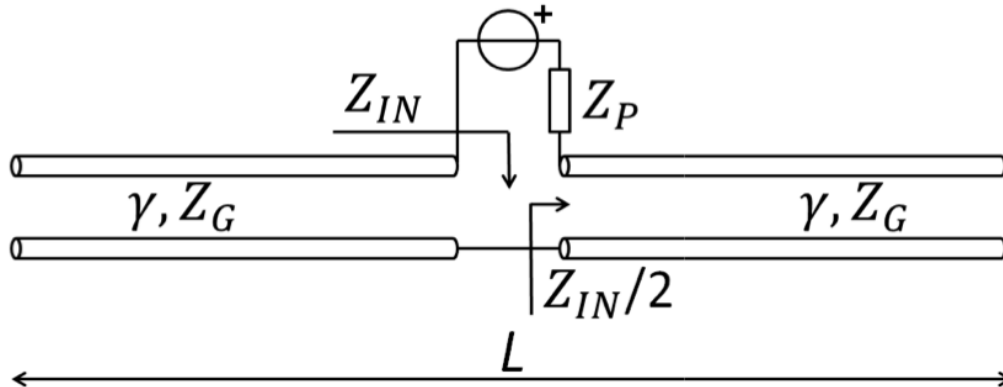


Figura 2.2: Modello a linea di trasmissione qualitativo dell'antenna patch a dipolo. Z_{IN} impedenza d'ingresso, γ costante di propagazione del modo, Z_G impedenza associata al modo, Z_p impedenza interna della sorgente.

Risultati antenna a singolo layer:

- la figura 2.3(a) mostra l'impedenza d'ingresso Z_{in} dell'antenna a singolo layer, per diversi valori di μ_c . Ogni traccia mostra un elevato picco per quanto riguarda la parte reale di Z_{in} . Ogni picco è centrato ad una frequenza in corrispondenza della quale la parte immaginaria tende ad annullarsi, per cui rappresenta un buon punto di lavoro, ossia di risonanza. Il fatto che la parte reale dell'impedenza d'ingresso assuma valori piuttosto alti, intorno ai 500Ω , significa che l'antenna ha un buon adattamento con sorgenti nella banda dei THz, come i photomixer, che generalmente hanno impedenze interne nell'ordine dei $10k\Omega$. La frequenza corrispondente ad ogni picco sembra spostarsi in modo uniforme all'aumentare del potenziale chimico;
- la figura 2.3(b) mostra l'efficienza totale η_t , definita come il prodotto dell'efficienza di radiazione per l'efficienza di adattamento ($\eta_t = \eta_r \cdot \eta_m$), quando l'antenna è collegata ad un photomixer di impedenza interna pari a $10k\Omega$. Si nota che i picchi sono centrati alle frequenze di risonanza e l'efficienza aumenta con l'aumentare di μ_c .

Risultati antenna a doppio layer:

2.1. Antenna patch a dipolo

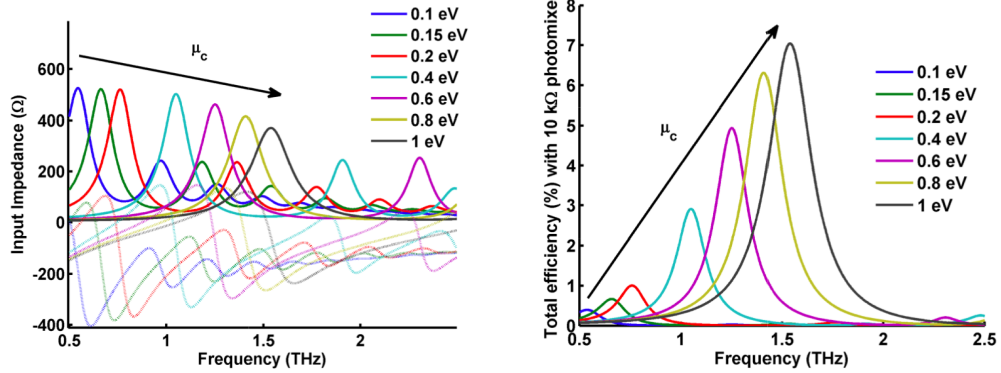
Dimensioni			Grafene		<i>GaAs</i>		<i>Al₂O₃</i>	
<i>L</i>	<i>W</i>	<i>G</i>	τ	<i>T</i>	ϵ_r	<i>tan</i> δ	ϵ_r	<i>tan</i> δ
$22\mu m$	$7\mu m$	$2\mu m$	$1ps$	$300K$	12.9	0.001	9	0.01

Tabella 2.1: Parametri di simulazione antenna patch.

- la figura 2.3(c) e 2.3(d) mostra chiaramente che l'effetto del secondo strato di grafene trasla l'impedenza d'ingresso e l'efficienza totale a frequenze maggiori rispetto al modello a singolo strato. Inoltre l'efficienza totale, a parità di μ_c , è maggiore rispetto al caso a singolo strato.

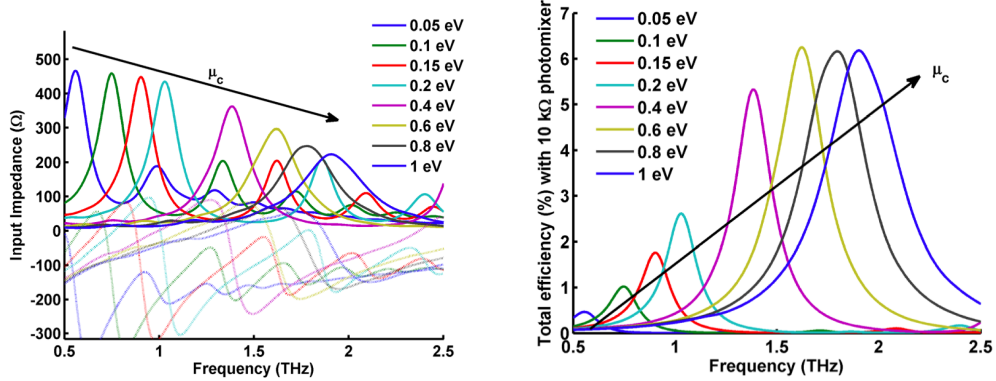
Sempre nel 2013 gli stessi autori propongono una struttura ibrida grafene-metallo per aumentare l'efficienza di radiazione, come mostrato in figura 2.4 [7]. L'integrazione del metallo, con dimensioni $L_t = 50\mu m$ e $W_t = 30\mu m$, permette di aumentare le dimensioni dell'antenna e quindi la sua efficienza di radiazione, preservando la riconfigurabilità dinamica e l'alta impedenza reale d'ingresso. La parte di metallo consiste di due elementi trapezoidali di spessore $300nm$ connessi al dipolo di grafene. I risultati, mostrati in figura 2.5 mostrano un aumento di $Re(Z_{in})$, ma soprattutto dell'efficienza totale, che raggiunge il 9% nel caso migliore, rispetto alla struttura senza metallo, di cui si è discusso precedentemente, che raggiungeva una efficienza totale massima del 3% usando gli stessi parametri.

2.1. Antenna patch a dipolo



(a) Parte reale e immaginaria dell'impedenza d'ingresso Z_{in} , modello a singolo layer.

(b) Efficienza totale di radiazione η_t , modello a singolo layer.



(c) Parte reale e immaginaria dell'impedenza d'ingresso Z_{in} , modello a doppio layer.

(d) Efficienza totale di radiazione η_t , modello a singolo layer.

Figura 2.3: Impedenza d'ingresso e efficienza totale di radiazione nel modello a singolo e doppio strato, in funzione della frequenza e di μ_c .

2.1. Antenna patch a dipolo

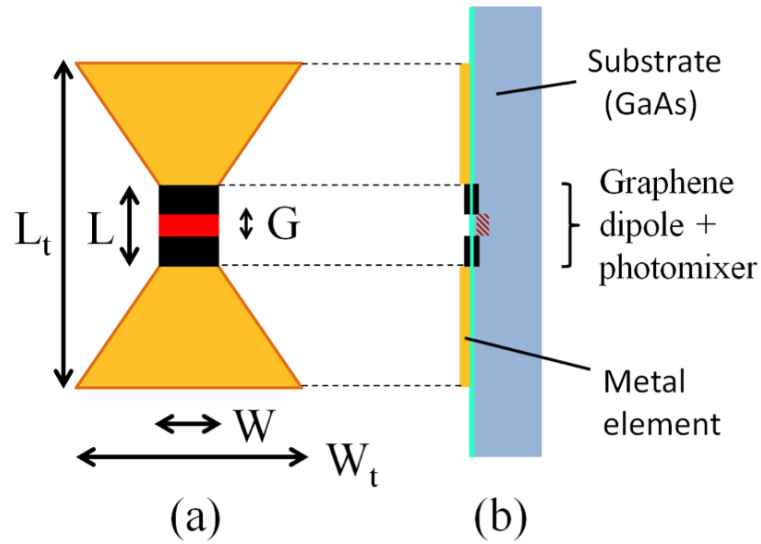


Figura 2.4: Antenna patch ibrida grafene-metallo. (a) Top view. (b) Cross section.

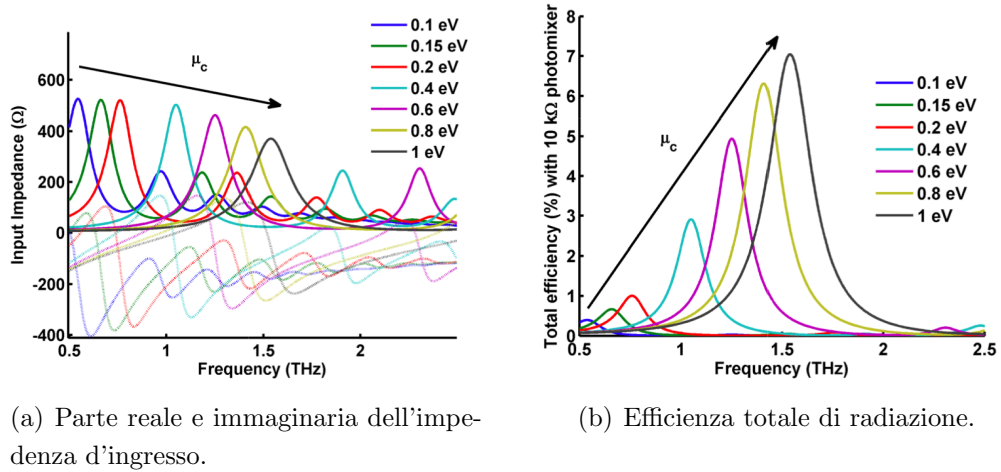


Figura 2.5: Impedenza d'ingresso e efficienza totale di radiazione del dipolo ibrido grafene-metallo, in funzione della frequenza e di μ_c .

2.2 Antenna reflectarray

Nel 2013 E. Carrasco et al. propongono un'antenna planare composta da arrays di celle riflettenti a base di grafene, nella banda dei THz. Questo struttura prende il nome di *reflectarrays* ed è l'equivalente di una lente in cui lo sfasamento viene applicato in riflessione invece che in trasmissione [8]. Questo sistema, tramite le celle riflettenti, introduce uno sfasamento dell'onda di superficie, ottenendo una sintesi di un desiderato fascio in campo lontano. Oltre che basse perdite, un profilo compatto e alta efficienza, il vantaggio principale è la possibilità di controllare dinamicamente la fase del campo riflesso a livello di ogni elemento e quindi di riconfigurare il fascio. La geometria e il principio di funzionamento sono mostrati in figura 2.6.

La patch quadrata di grafene è applicata sopra un substrato di silicio spesso $30\mu m$ ($\epsilon_r = 3.75$ e $\tan\delta = 0.004$). Le dimensioni della cella elementare sono $a = b = 14\mu m$ mentre quelle del grafene sono $a_p = b_p = 10\mu m$. La tensione è applicata tra lo strato di silicio policristallino (50 nm) e lo strato di grafene, separati da uno di allumina (10 nm). La patch di grafene è connessa, tramite una sottile linea composta di grafene, ad un elettrodo posto a lato della cella. In questo modo, gli elementi sulla stessa riga sono interconnessi e saranno soggetti alla stessa tensione applicata, mentre le righe differenti possono essere controllate indipendentemente.

Nei reflectarray convenzionali metallici, la patch risuona quando la lunghezza è nell'ordine della mezza lunghezza d'onda rispetto alle caratteristiche del dielettrico utilizzato. Nella patch di grafene proposta, invece, la risonanza avviene a lunghezze molto inferiori, come descritto nel Capitolo 1, al di sotto del $\lambda/10$, per via del modo plasmonico che si propaga molto più lentamente.

La fase dell'onda riflessa, rispetto ad un'onda che incide normalmente, è stata calcolata per differenti dimensioni della patch e per differenti valori di μ_c tramite simulazione elettromagnetica. Il risultato è rappresentato in figura 2.7. Da quest'ultimo è possibile identificare la dimensione della patch per ottenere in modo ottimale il controllo dinamico sulla fase per un dato range di valori del potenziale chimico. In questo caso si evince che valori di μ_c maggiori di 0.52 eV non servono poichè la variazione di fase è quasi trascurabile per tutte le dimensioni della patch. La dimensione che massimizza la variazione

2.2. Antenna reflectarray

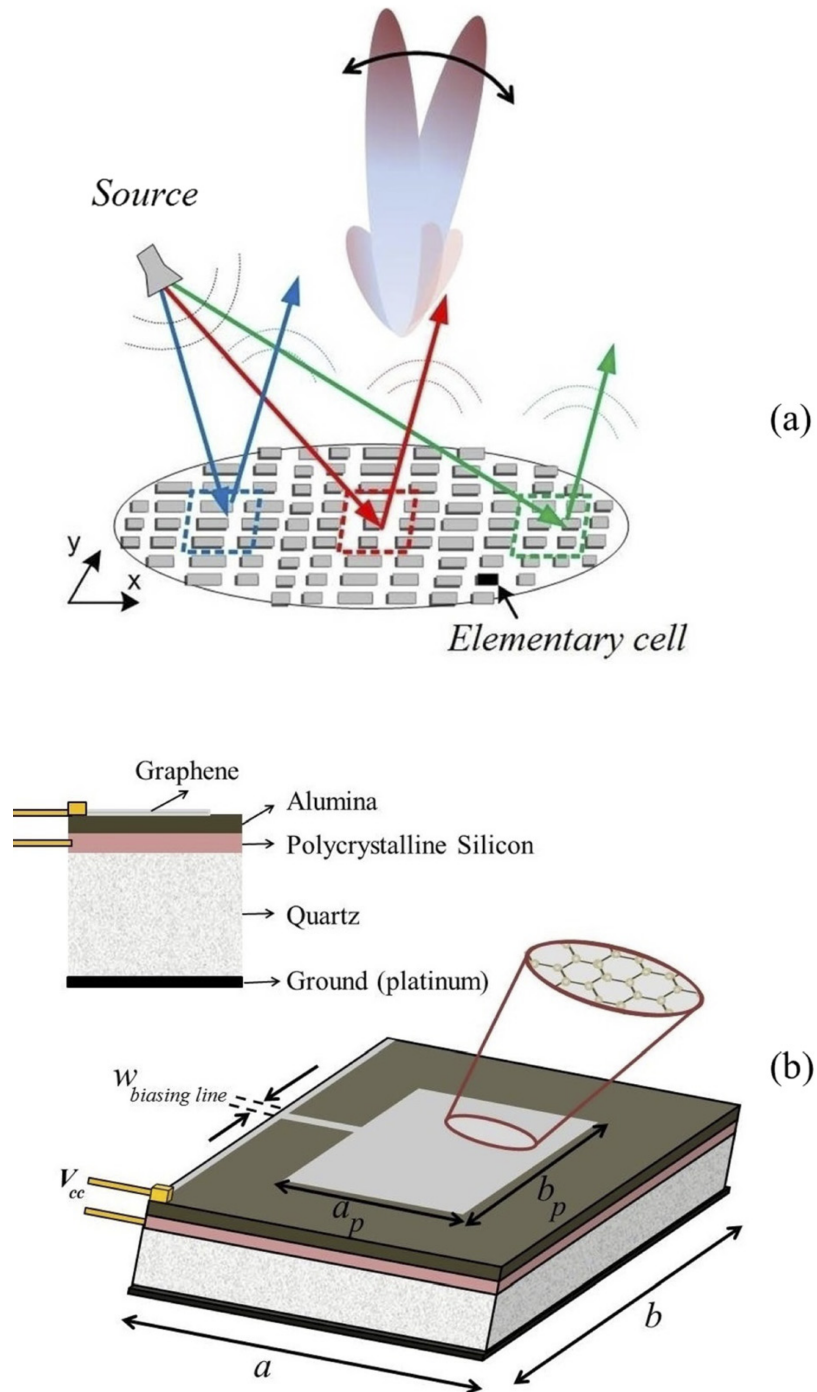


Figura 2.6: Antenna reflectarray. (a) Concetto generale. (b) Cella elementare a base di grafene.

2.2. Antenna reflectarray

di fase è ottenuta per una patch di $10\mu m$, la quale comporta sfasamenti intorno ai 300° .

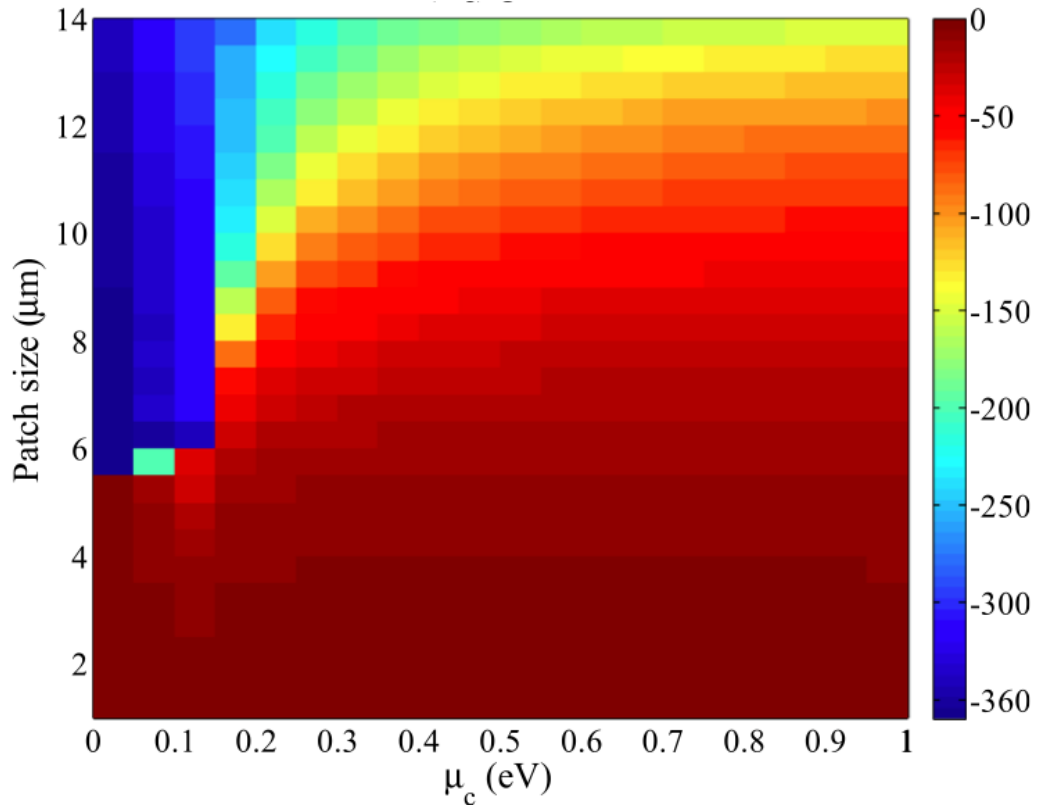


Figura 2.7: Antenna reflectarray: sfasamento dell'onda riflessa introdotto da patch quadrate di differenti dimensioni in funzione di μ_c a frequenza 1.3 THz.

In figura 2.8 sono mostrate fase ed ampiezza del coefficiente di riflessione della cella elementare di dimensioni $a = b = 14\mu m$ e $a_p = b_p = 10\mu m$, nel caso di un'onda piana incidente perpendicolarmente, in funzione della frequenza e al variare di μ_c . A causa della simmetria del modello, si otterrebbe una risposta identica per una polarizzazione ortogonale. Come già accennato, variando il potenziale chimico della cella si ottiene una variazione di fase in un range di 300° . Le perdite della cella variano tra 0.5 dB e 6 dB tra 1.1 THz e 1.6 THz.

La cella riflettente può essere modellizzata tramite un circuito equivalente, come mostrato in figura 2.9. Lo strato di grafene è rappresentato da un

2.2. Antenna reflectarray

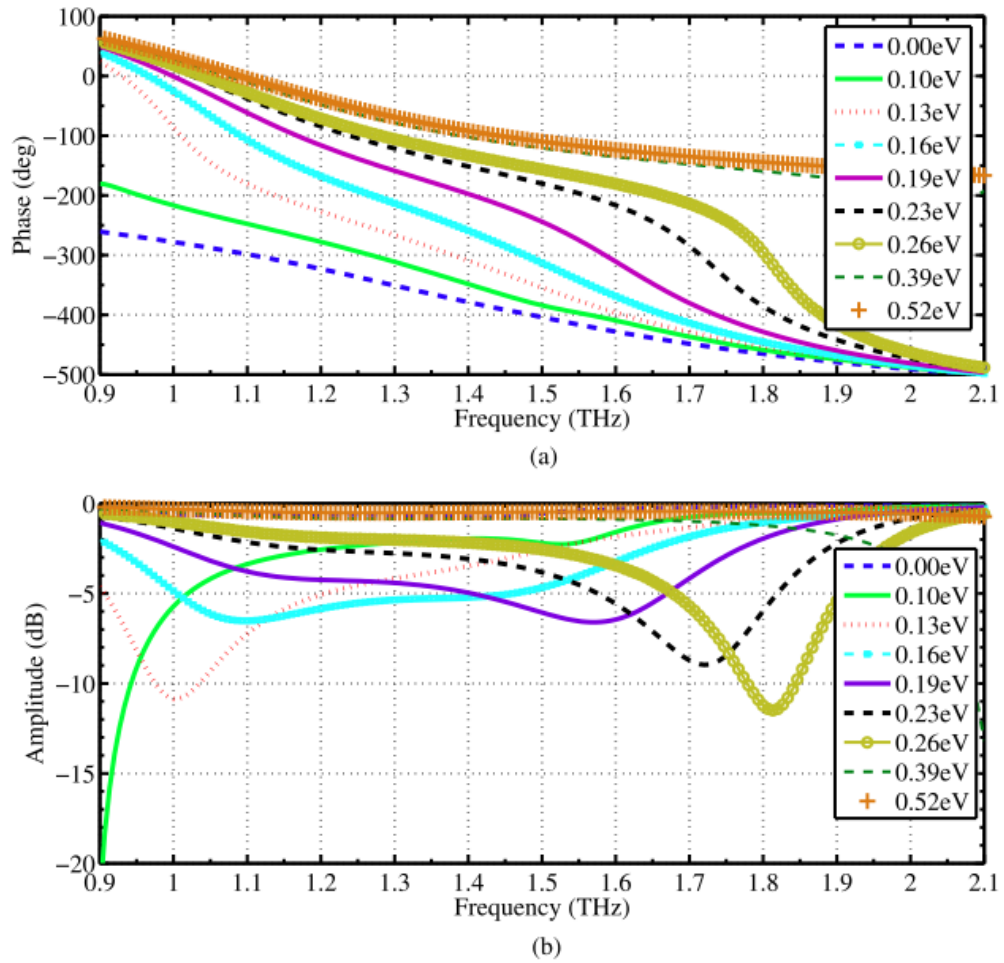


Figura 2.8: Antenna reflectarray: coefficiente di riflessione della cella elementare di dimensione $10\mu m$ in funzione della frequenza al variare di μ_c . (a) Fase e (b) ampiezza.

2.2. Antenna reflectarray

circuito R - L - C in parallelo con il fondo del substrato e riferito all'impedenza intrinseca del vuoto η_0 . Si osserva che la resistenza e l'induttanza si riducono quando aumenta il potenziale chimico. Inoltre la componente capacitiva dell'impedenza equivalente è abbastanza indipendente da μ_c , ma aumenta notevolmente con le dimensioni della patch.

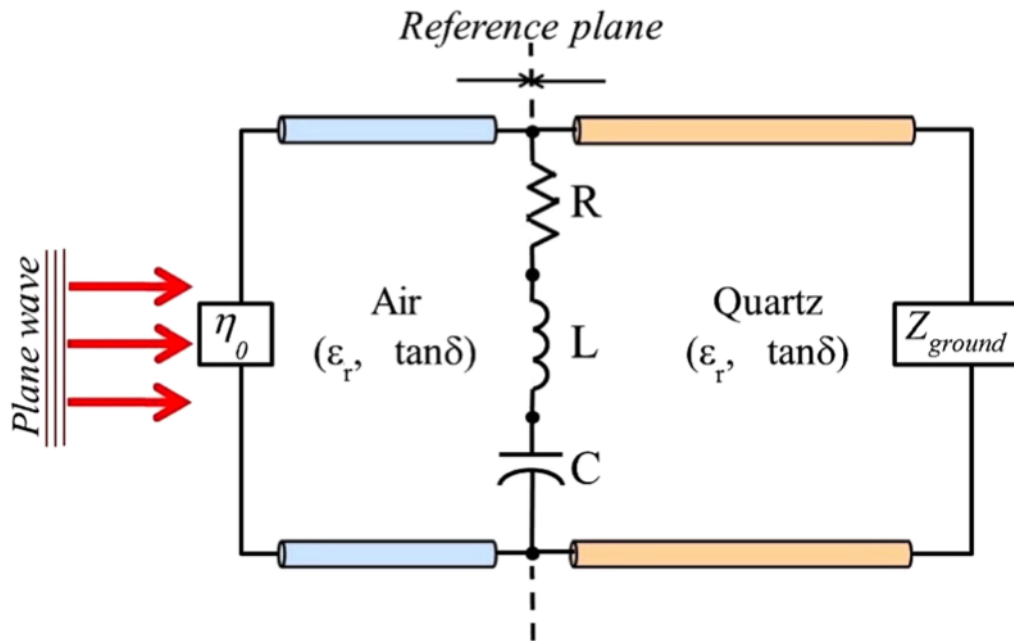


Figura 2.9: Circuito equivalente della cella elementare reflectarray.

2.3 Antenna leaky-wave

Nel 2013 M. Esquiús-Morote et al. propongono un concetto di *leaky-wave antenna* (LWA) in grafene con una modulazione sinusoidale della reattanza della conducibilità superficiale. Il risultato è simile a quello di una lente riconfigurabile in riflessione a frequenza fissata [9]. L'antenna opera a frequenze del terahertz ed è composta da uno strato di grafene depositato sopra un substrato di silicio con fondo metallico. Al di sotto del grafene ci sono una serie di porte, in silicio policristallino, che permettono di applicare una tensione locale. Per ottenere l'effetto leaky-mode, la reattanza superficiale del grafene è modulata sinusoidalmente tramite l'effetto di campo elettrico, applicando adeguatamente differenti tensioni alle varie porte. Lo scopo è quello di ottenere un'antenna la cui direttività sia controllata dinamicamente. Questo effetto è chiamato dagli autori *beamscanning*.

Come mostrato in figura 2.10, lo strato di grafene supporta la propagazione dei SPP TM, che possono essere controllati tramite le tensioni applicate alle varie porte V_{DC} (si noti che il layer di grafene è connesso al piano metallico di fondo). In questo modo si controlla localmente la conducibilità complessa σ_i o l'impedenza superficiale, essendo $Z_S = R_S + jX_S$. La reattanza superficiale X_S viene modulata lungo l'asse y secondo la relazione

$$X_S = X'_S \left[1 + M \sin \left(\frac{2\pi y}{p} \right) \right] \quad (2.1)$$

dove X'_S è la reattanza superficiale media, M l'indice di modulazione e p il periodo della sinusoide, come mostrato in figura 2.11. L'interazione tra l'onda superficiale e la reattanza modulata crea un effetto di radiazione secondo il principio dei reticoli di Bragg. Il numero d'onda k_y dell'armonica fondamentale sulla superficie di grafene può essere scritto come

$$k_y = \beta_{spp} + \Delta\beta_{spp} - j(\alpha_{spp} + \alpha_{rad}) \quad (2.2)$$

dove β_{spp} è la costante di propagazione del modo superficiale plasmonico del grafene non-modulato, $\Delta\beta_{spp}$ è la variazione imposta dalla modulazione, α_{spp} è la costante di attenuazione causata dalle perdite e α_{rad} la costante di attenuazione dovuta al modo leaky.

2.3. Antenna leaky-wave

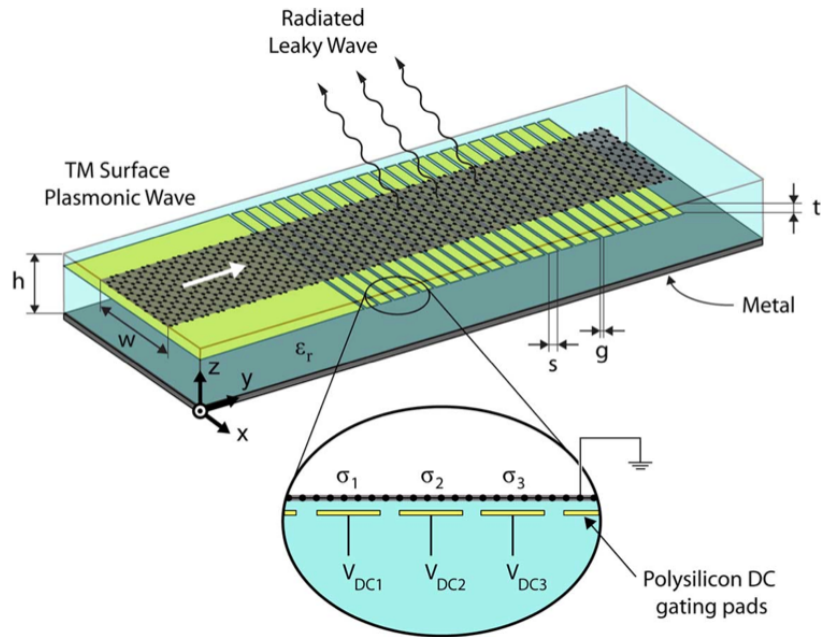


Figura 2.10: Antenna leaky-wave con modulazione sinusoidale.

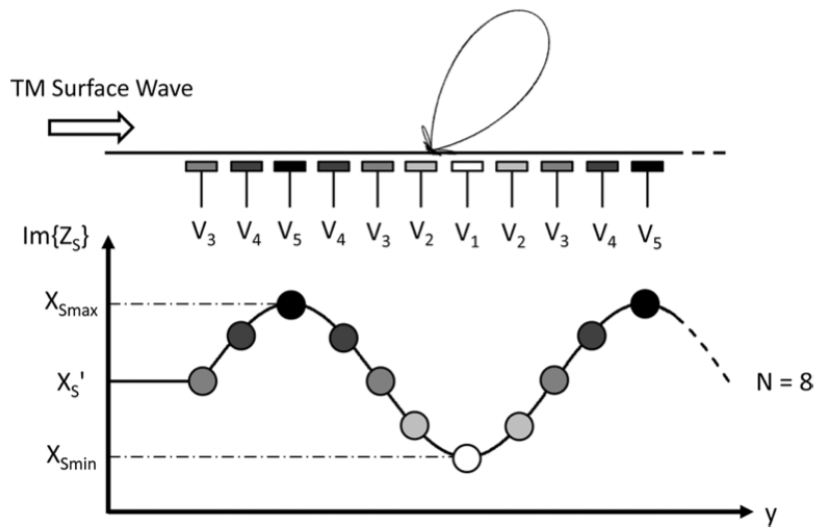


Figura 2.11: Antenna leaky-wave: rappresentazione schematica della relazione tra tensione applicata alle varie porte V_{DC} e reattanza X_S .

2.3. Antenna leaky-wave

Frequenza		Grafene			Substrato			Gate	
f_0	τ	T	W	ϵ_r	h	t	s	g	
2 THz	1ps	300°k	200 μ m	3.8	60 μ m	20nm	4.8 μ m	0.2 μ m	

Tabella 2.2: Parametri usati nell'antenna leaky-mode.

A questo punto è possibile ricavare con buona approssimazione l'angolo di radiazione del fascio θ_0 dalla relazione

$$\theta_0 \simeq \arcsin \left(\frac{\beta_{spp}}{k_0} - \frac{\lambda_0}{p} \right). \quad (2.3)$$

In questa configurazione, l'antenna può irradiare sia nel semispazio superiore che in quello inferiore, in base alla costante dielettrica ϵ_r del substrato. Inoltre, il piano metallico posto alla base della struttura è usato come riflettore. In questo modo, si sceglie accuratamente lo spessore del substrato h in modo tale che l'onda principale e quella riflessa siano in fase.

I risultati ottenuti sono stati calcolati usando i parametri descritti in tabella 2.2. In figura 2.12 viene mostrato come evolve l'angolo centrale del fascio di radiazione θ_0 in funzione del periodo p della sinusoide di modulazione. N è il numero di porte che definiscono un periodo p . Dalla (2.3) si ottengono quattro possibili configurazioni di fascio centrate a -45.4° , -9.3° , 15.4° , 35.5° variando N da 7 a 10 (figura 2.13). L'efficienza di radiazione, in questo caso, raggiunge circa l'11% ed aumenta usando un range maggiore di V_{DC} , in modo da ottenere indici di modulazione M maggiori. Inoltre è possibile aumentare la direttività usando valori minori di ϵ_r ; in questo modo diminuisce β_{spp} e α_{spp} e perciò aumenta la lunghezza efficace dell'antenna, essendo $L_e = 3/(2(\alpha_{spp} + \alpha_{rad}))$.

Concludendo, possiamo dire che questa antenna offre innovative performance nella banda dei THz come il controllo elettronico di diverse caratteristiche di radiazione mantenendo un'efficienza di radiazione sopra il 10%. Le maggiori limitazioni di questa struttura sono imposte dalle condizioni di purezza del grafene (τ) e dal range di tensioni applicabili alle varie porte.

2.3. Antenna leaky-wave

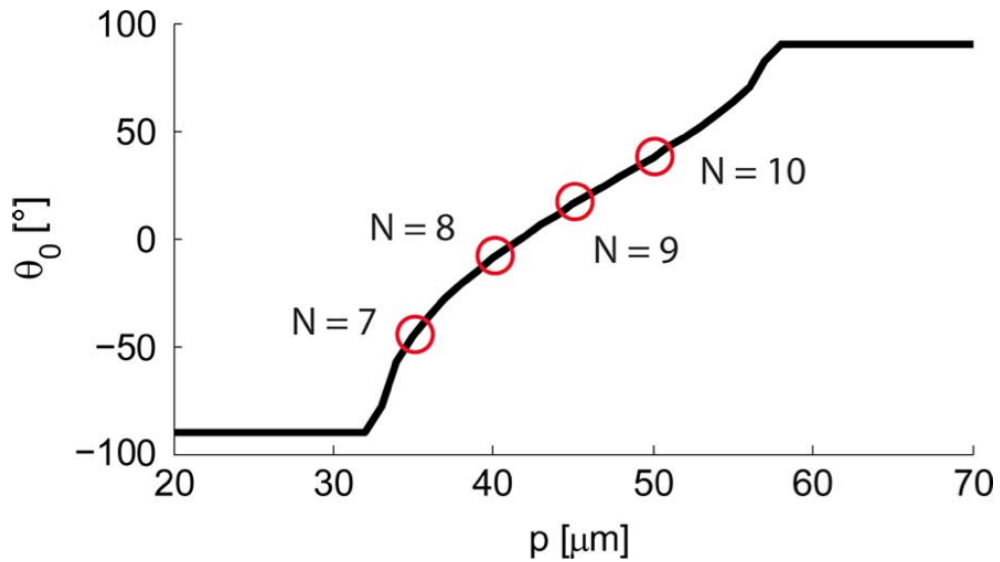


Figura 2.12: Antenna leaky-wave: angolo di radiazione θ_0 in funzione del periodo p . N è il numero di porte che definiscono un periodo di modulazione p .

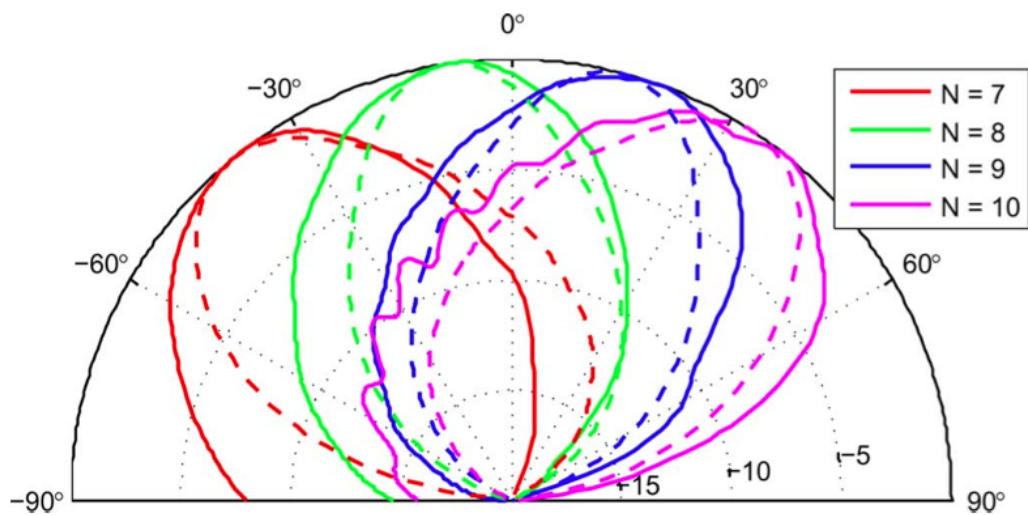


Figura 2.13: Antenna leaky-wave: pattern di radiazione nel piano ZY per differenti valori di N . La linea continua rappresenta i risultati simulati mentre quella tratteggiata quelli teorici.

Capitolo 3

Simulazioni di antenne patch in grafene

In questo capitolo viene descritta la parte principale di questo lavoro di tesi, ossia la parte sperimentale. In esso sono descritte le simulazioni numeriche: le geometrie analizzate e risultati ottenuti. Le geometrie sono principalmente due: l'antenna patch a dipolo e l'antenna patch ad anello. Entrambe sono studiate nelle due configurazioni a singolo e doppio strato di grafene e successivamente ne viene fornito un confronto in termini di performance.

Lo scopo di questo lavoro può essere riassunto nei tre punti seguenti:

- verificare l'applicabilità di alcuni casi proposti in letteratura, utilizzando un software di simulazione diverso da quello usato dagli autori degli articoli che compongono lo stato dell'arte;
- ottenere un confronto con i risultati descritti in letteratura;
- proporre ed analizzare una nuova geometria d'antenna in grafene.

In riferimento al primo punto, si è deciso di prendere una geometria d'antenna in grafene ben nota, come quella descritta nel sottocapitolo 2.1, replicarne, nel modo più dettagliato e simile la struttura e confrontare i risultati ottenuti nei due casi. Tuttavia le dimensioni dell'antenna simulata sono diverse da quella descritta nella sezione 2.1; esse fanno riferimento a [10]. In questo modo è stato possibile, da una parte, verificare la veridicità dei risultati bibliografici,

dall'altra, verificare che il software di simulazione funzionasse correttamente nel contesto applicativo. Quest'ultima osservazione non è affatto banale se si pensa che lo studio di queste antenne è condotto a frequenze inusuali (frequenze dei THz) e che perciò hanno dimensioni piccolissime, nell'ordine dei micron.

La geometria proposta è un'antenna ad anello, di cui, ad oggi, non si trova una descrizione dettagliata in letteratura (per il grafene s'intende).

In sintesi, le antenne simulate sono le seguenti due:

- patch a dipolo;
- patch ad anello.

Le patch sono appoggiate sopra un substrato infinito sia nel piano XY sia nel semispazio inferiore ($Z < 0$). L'interfaccia superiore invece è formata da grafene-aria.

Le simulazioni sono state effettuate tramite il software di simulazione elettromagnetica Feko. Feko implementa un metodo di calcolo numerico denominato Method of Moments (MoM), il quale è descritto con maggiore dettaglio in Appendice A.

L'implementazione dello strato di grafene all'interno del software di simulazione avviene tramite un foglio d'impedenza. In altre parole, il grafene è modellizzato come uno strato dielettrico con spessore infinitesimo (2D). Ad ogni frequenza di analisi viene assegnata parte reale e immaginaria dell'impedenza superficiale $Z_S = 1/\sigma$, calcolata dalla (1.3). In questo modo si crea un set discreto di frequenze di analisi che produce un set di punti di output. I grafici sono ottenuti interpolando i risultati. Per motivi computazionali, per ogni simulazione sono stati calcolati 30-50 punti mediamente, in una banda di circa 2/4 THz.

Nel calcolo numerico con metodo MoM la struttura viene discretizzata e suddivisa in sotto blocchi, in questo caso triangoli, con lato pari a $0.6/0.7\mu m \sim \frac{\lambda_{1THz}}{500}$. Questa operazione prende il nome di *mesh*. MoM permette di *meshare* solo la patch e non lo spazio libero e il substrato infinito, risparmiando notevolmente risorse di calcolo, senza approssimazioni.

3.1 Antenna patch a dipolo

In questa sezione sono riportate le simulazioni dell'antenna patch a dipolo a singolo e doppio strato di grafene. I risultati sono rappresentati in termini d'impedenza d'ingresso, correnti superficiali, guadagno e diagramma di radiazione.

3.1.1 Antenna patch a dipolo: singolo strato di grafene

La geometria proposta è mostrata in figura 3.1. Uno strato di grafene con spessore infinitesimo è appoggiato sopra un substrato dielettrico, infinito nel piano XY e nel semispazio $Z < 0$. Il substrato è composto da arseniuro di gallio (GaAs) e ha una costante dielettrica relativa pari a $\epsilon_r = 12.9$. Si è deciso di annullare le perdite del substrato, essendo infinito, impostando la tangente di perdita $\tan\delta = 0$. Le due patch coplanari di grafene sono collegate tra loro tramite l'alimentazione; nessun gap è presente tra di esse. L'alimentazione, posta esattamente al centro della struttura, è un generatore di tensione. La tensione è impostata a 1 V. La dimensione della patch totale di grafene è $W = 7\mu m$ e $L = 9\mu m$. Nel calcolo della conducibilità superficiale sono stati usati i parametri $\tau = 1ps$ e $T = 300^\circ K$.

Le simulazioni sono state calcolate per $\mu_c = 0$ e $\mu_c = 0.2$. In figura 3.2 è mostrato l'andamento dell'impedenza d'ingresso Z_{IN} , parte reale e parte immaginaria, calcolata alla porta in cui è applicata l'alimentazione. In accordo con la bibliografia, in corrispondenza dei picchi della parte reale di Z_{IN} , la parte immaginaria tende ad annullarsi. Le frequenze corrispondenti a questa situazione identificano i punti di risonanza dell'antenna. Sempre in accordo con quanto descritto nel capitolo 2, al crescere del potenziale chimico la risonanza trasla a frequenze maggiori. La parte reale dell'impedenza d'ingresso si attesta sui 300Ω in entrambi i casi. Le frequenze di risonanza dell'antenna a dipolo proposta sono 0.49 e 1.19 THz per $\mu_c = 0$ e $\mu_c = 0.2$, rispettivamente. L'antenna irradia verso il substrato. Il guadagno d'antenna, nel piano ZX è -21 dBi quando $\mu_c = 0$ e -6 dBi quando $\mu_c = 0.2$, riferito alle rispettive frequenze di risonanza, come mostrato in figura 3.3. Anche se all'aumentare del potenziale chimico il guadagno migliora sensibilmente, è evidente che questa geometria d'antenna, in queste condizioni, non offre una buona efficienza di

3.1. Antenna patch a dipolo

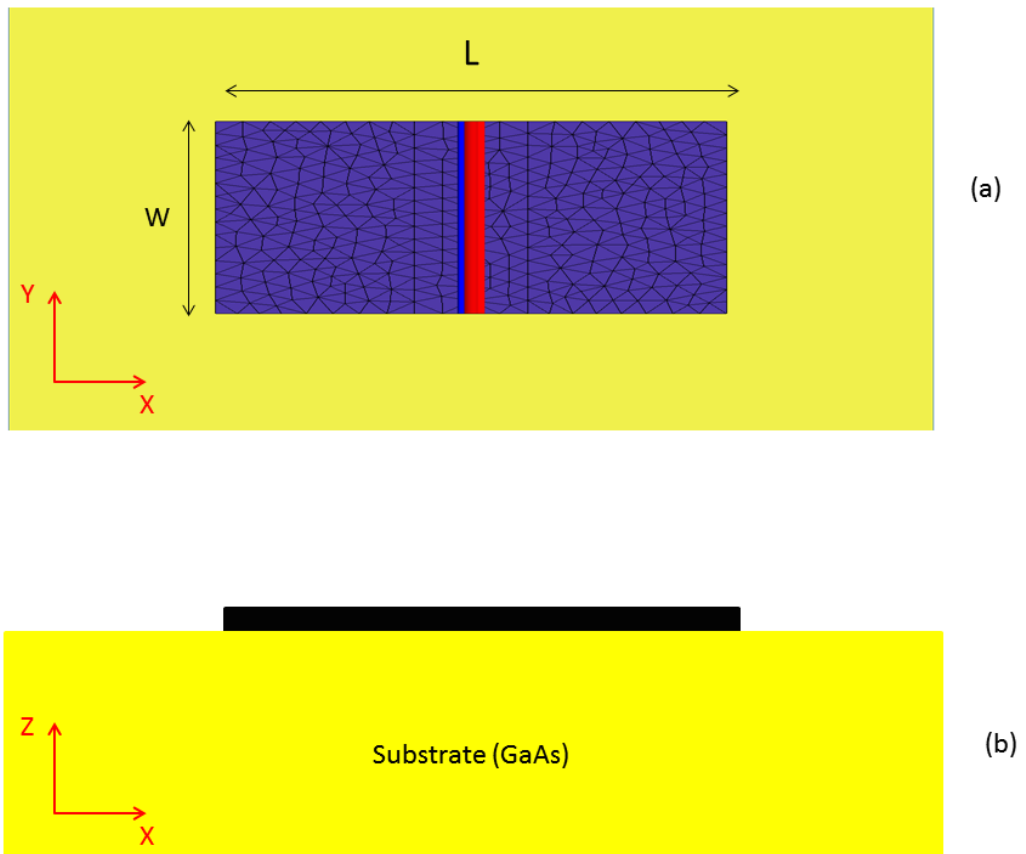


Figura 3.1: Schema del dipolo a singolo strato di grafene. (a) Vista frontale. (b) Vista laterale.

3.1. Antenna patch a dipolo

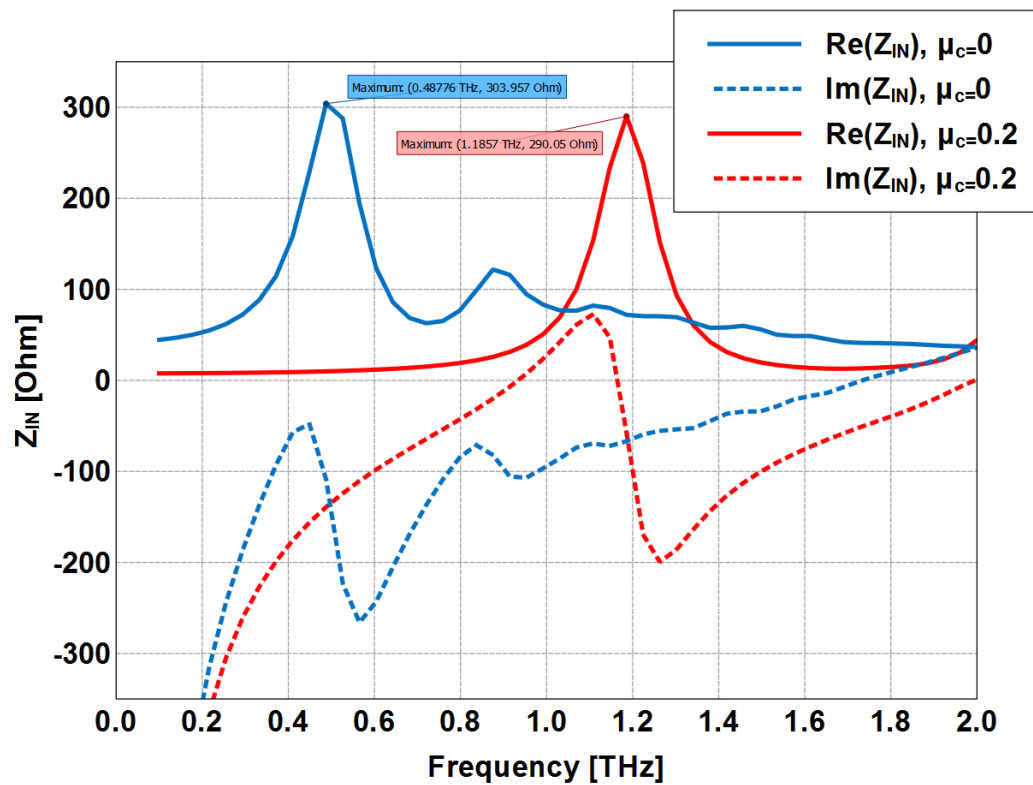


Figura 3.2: Parte reale e immaginaria dell'impedenza d'ingresso vista alla porta di alimentazione dell'antenna a dipolo a singolo strato, calcolata per $\mu_c = 0$ e $\mu_c = 0.2$.

3.1. Antenna patch a dipolo

radiazione. Il diagramma di radiazione è simmetrico sul piano azimutale, come mostrato in figura 3.4. Infine, in figura 3.5 è rappresentata la corrente superficiale in quadratura per $\mu_c = 0.2$, $f = 1.19THz$.

In tabella 3.1 e 3.2 vengono riassunti i parametri di simulazione e i risultati ottenuti in termini di frequenza di risonanza e guadagno massimo, rispettivamente.

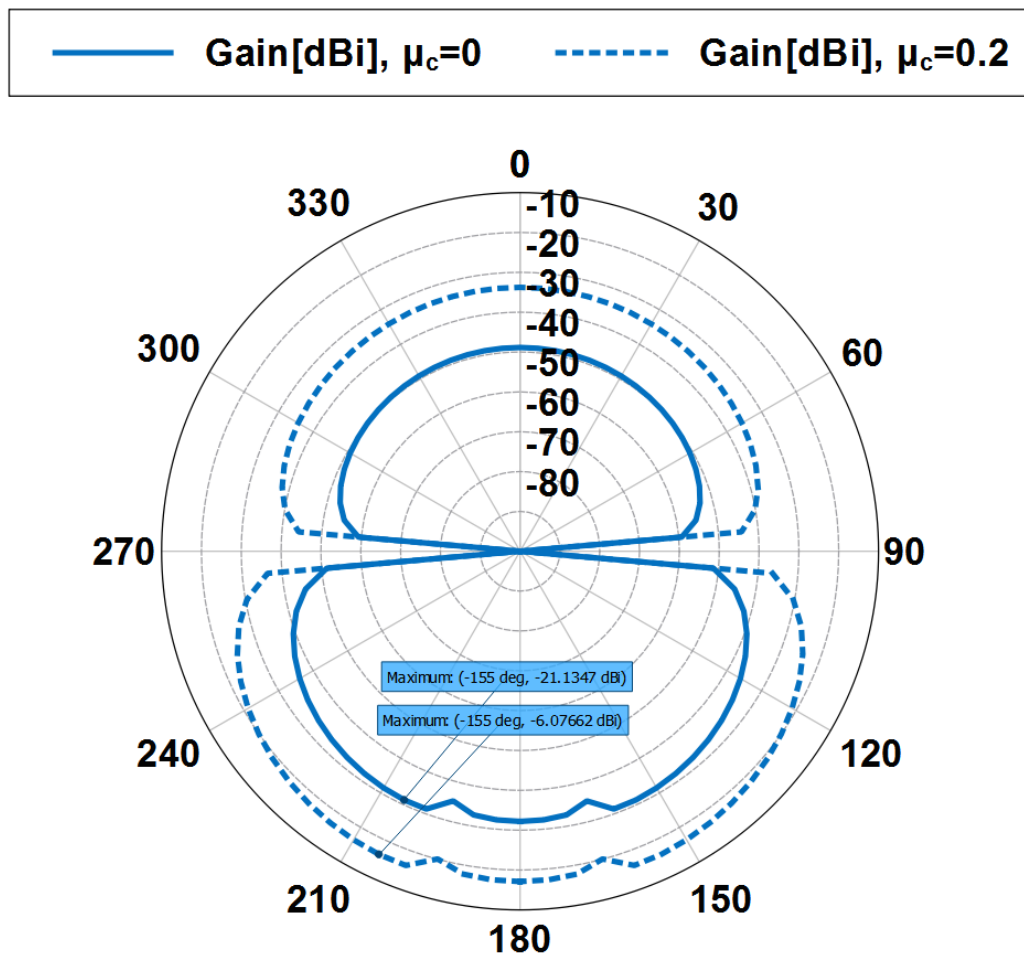


Figura 3.3: Guadagno dell'antenna a dipolo a singolo strato nel piano ZX, calcolato per $\mu_c = 0$, $f = 0.49THz$, e $\mu_c = 0.2$, $f = 1.19THz$.

3.1. Antenna patch a dipolo

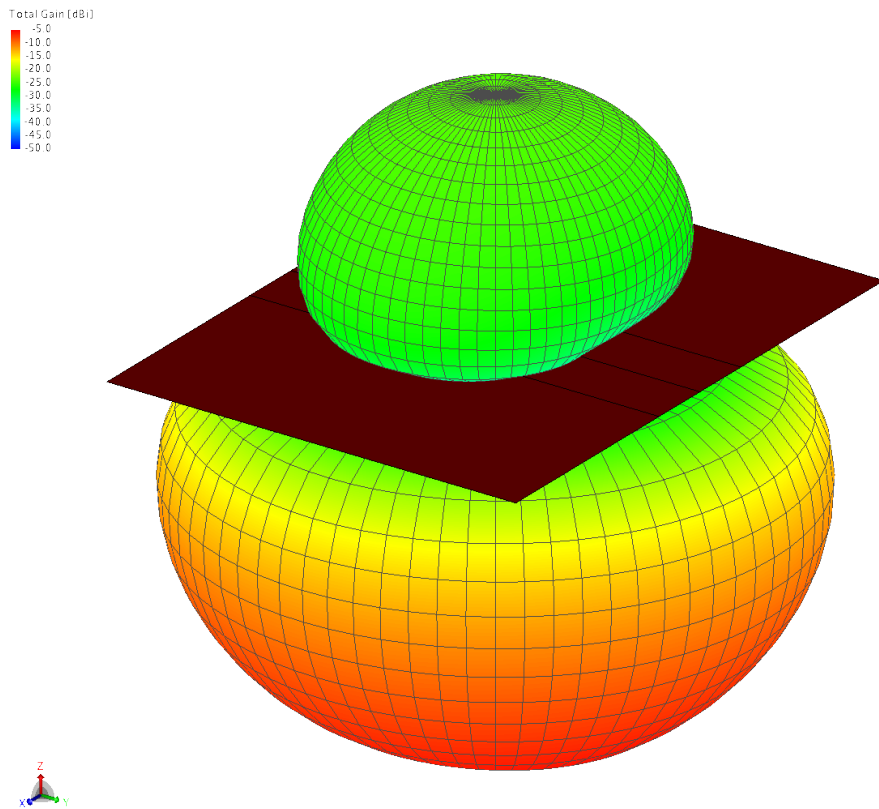


Figura 3.4: Diagramma di radiazione 3D (guadagno) dell'antenna a dipolo a singolo strato, calcolata per $\mu_c = 0.2$, $f = 1.19THz$.

3.1. Antenna patch a dipolo

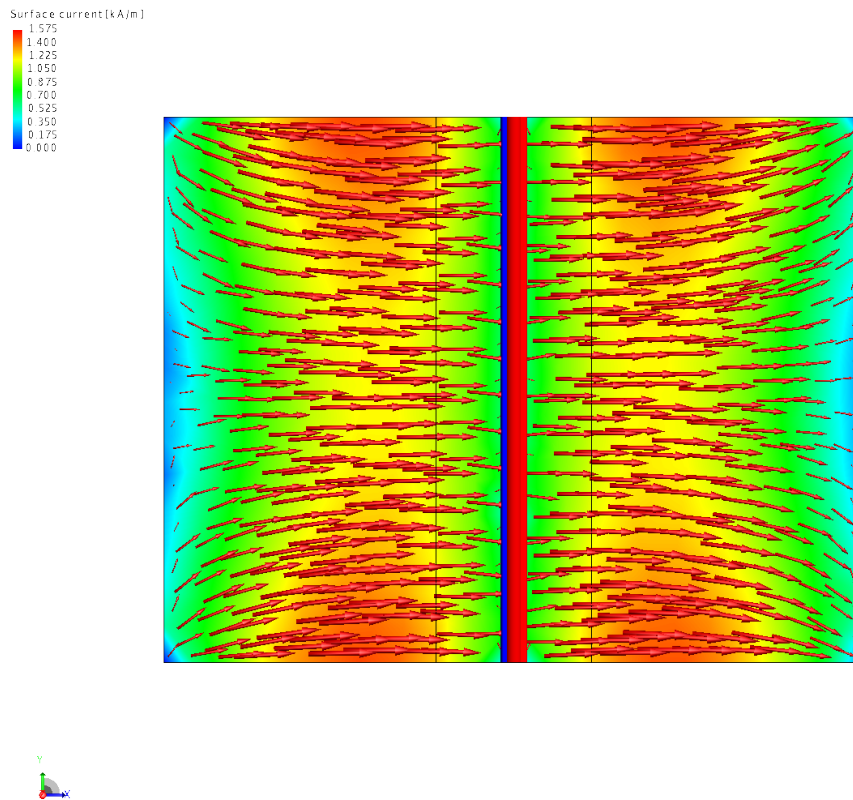


Figura 3.5: Corrente superficiale in quadratura dell'antenna a dipolo a singolo strato, calcolata per $\mu_c = 0.2$, $f = 1.19THz$.

3.1. Antenna patch a dipolo

3.1.2 Antenna patch a dipolo: doppio strato di grafene

La geometria a doppio strato di grafene è molto simile a quella a singolo strato, descritta nella sezione precedente. La vista frontale non cambia; in figura 3.6 viene fornita una rappresentazioni schematica della vista laterale. Le dimensioni sono le stesse dell'antenna a dipolo a singolo layer. L'unica differenza è l'introduzione di uno strato dielettrico di allumina, spesso $t = 100nm$ ($\epsilon_r = 9$, $\tan\delta = 0.01$), che separa i due strati di grafene. L'alimentazione è posta al centro del layer inferiore di grafene (quello a contatto col substrato). Nel layer superiore viene mantenuto un gap di $2\mu m$ tra le due patch co-planari. Per motivi implementativi del software di simulazione, non è stato possibile creare un gap tra le faccie di grafene co-planari alimentate (layer inferiore). Questo introduce una piccola discordanza geometrica con il modello proposto in bibliografia descritto nel sottocapitolo 2.1.

I risultati sono stati calcolati per $\mu_c = 0$, $\mu_c = 0.1$ e $\mu_c = 0.2$. La figura 3.7 mostra l'andamento di Z_{IN} in funzione della frequenza e al variare del potenziale chimico. Si ricava che l'antenna a dipolo a doppio strato di gra-

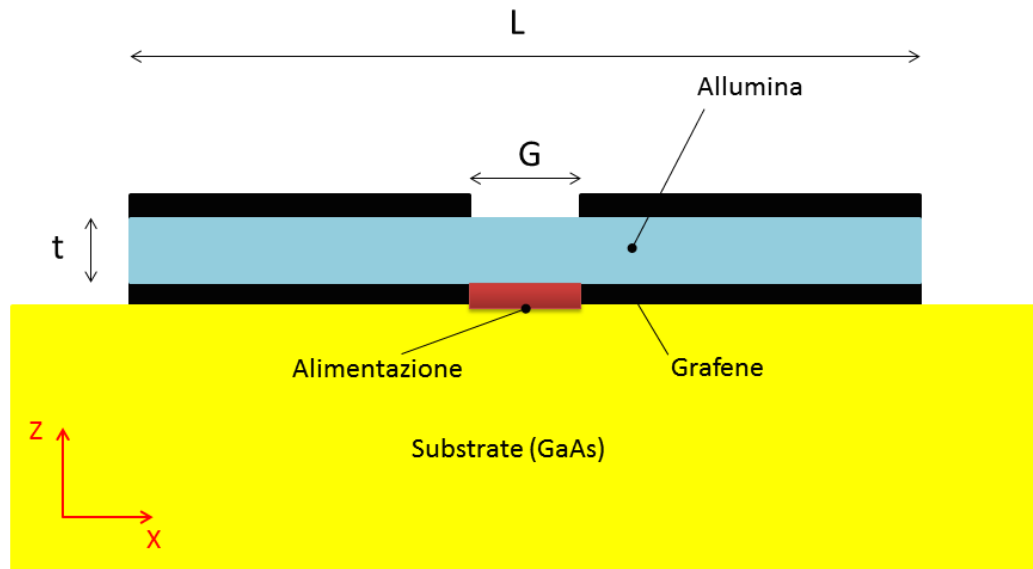


Figura 3.6: Rappresentazione schematica dell'antenna a dipolo a doppio strato (vista laterale).

3.1. Antenna patch a dipolo

fene risuona alle frequenze $f = 0.9THz$, $f = 1.4THz$ e $f = 1.98THz$ per valori del potenziale chimico $\mu_c = 0$, $\mu_c = 0.1$ e $\mu_c = 0.2$, rispettivamente. I picchi della parte reale dell'impedenza si attestano sui 450Ω mentre la parte immaginaria tende ad annullarsi in prossimità della frequenza di risonanza. In figura 3.8 è rappresentato il guadagno nel piano ZX , calcolato nelle rispettive risonanze, il quale raggiunge valori di -12.4, -4, 1.2 dBi per i valori $\mu_c = 0, f = 0.9THz$; $\mu_c = 0.1, f = 1.4THz$; $\mu_c = 0.2, f = 1.98THz$, rispettivamente. Come ci si aspetta, la configurazione più efficiente si ottiene per il valore più alto del potenziale chimico. Il diagramma di radiazione 3D del guadagno è rappresentato in figura 3.9 e mostra, come nel caso a singolo layer, che l'antenna irradia verso il substrato e che la radiazione è simmetrica nel piano azimutale.

Infine, in figura 3.10 si osserva l'andamento delle correnti superficiali, in quadratura rispetto alla sorgente, calcolate per $\mu_c = 0.2, f = 1.98THz$. In figura 3.10(a) è rappresentata la corrente dello strato superiore, visto dall'alto verso il basso (la parte centrale è quella dello strato inferiore per via del gap), mentre in figura 3.10(b) è rappresentata quella dello strato inferiore, visto dal basso verso l'alto.

In tabella 3.1 e 3.2 vengono riassunti i parametri di simulazione e i risultati ottenuti in termini di frequenza di risonanza e guadagno massimo, rispettivamente.

3.1. Antenna patch a dipolo

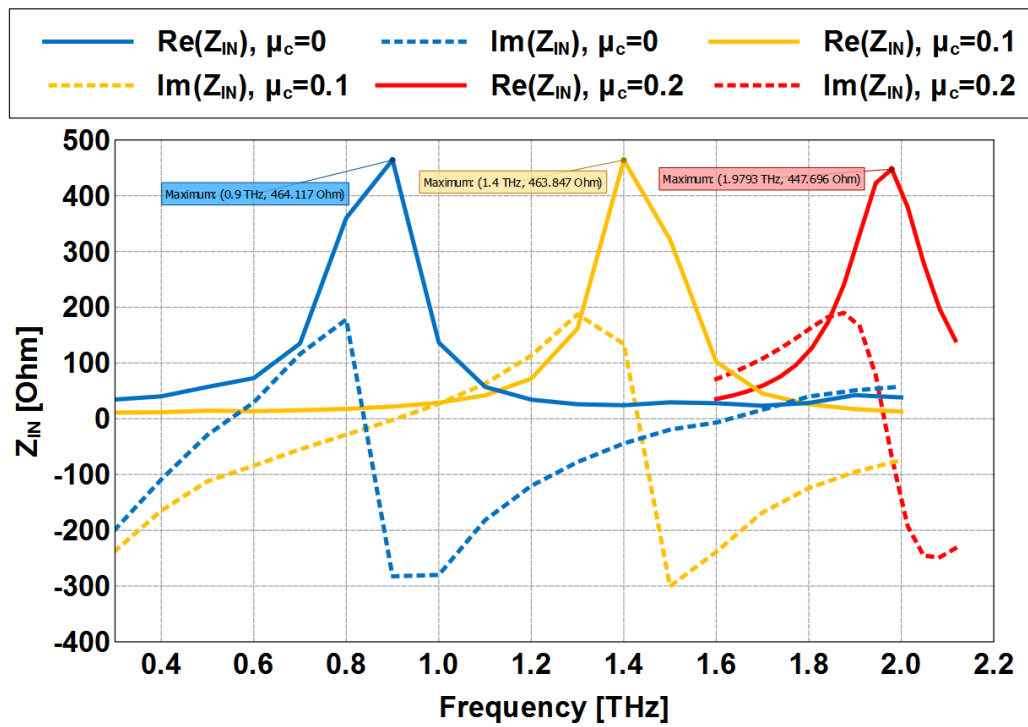


Figura 3.7: Parte reale e immaginaria dell'impedenza d'ingresso vista alla porta di alimentazione dell'antenna a dipolo a doppio strato, calcolata per $\mu_c = 0$, $\mu_c = 0.1$ e $\mu_c = 0.2$.

3.1. Antenna patch a dipolo

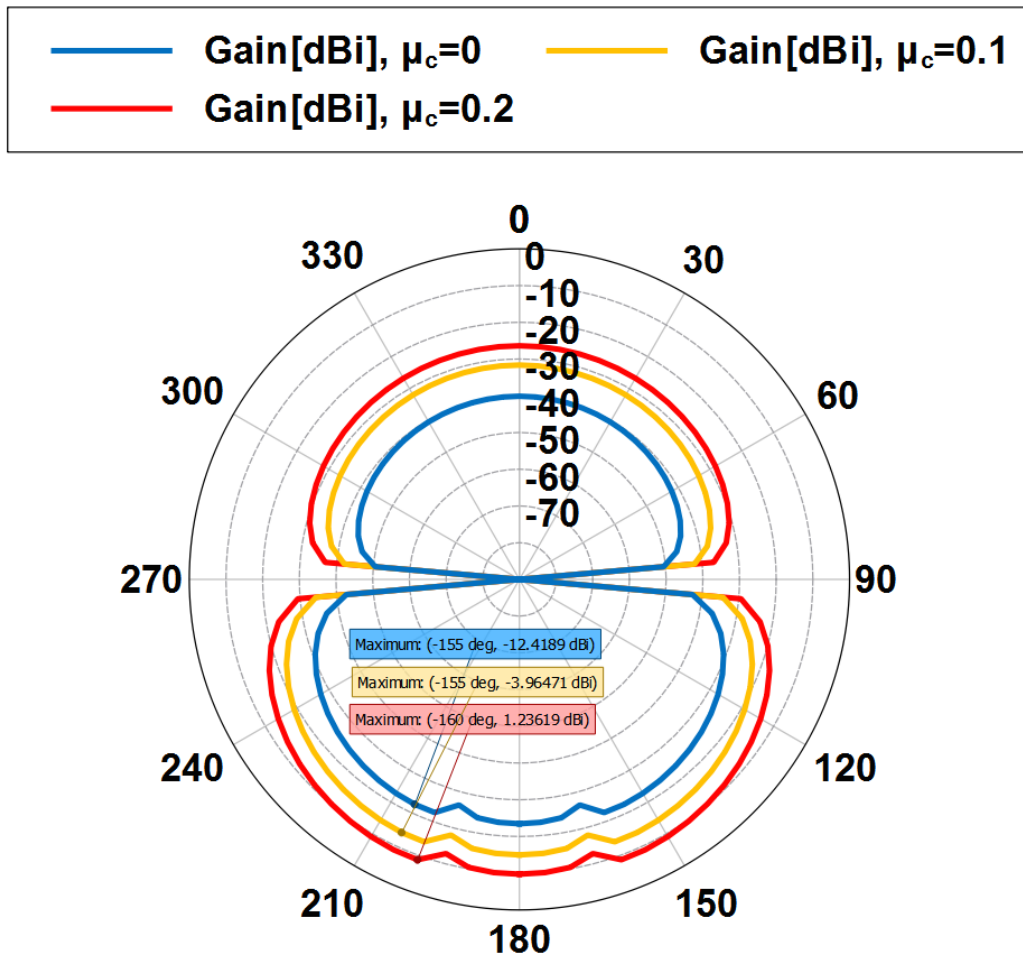


Figura 3.8: Guadagno dell'antenna a dipolo a doppio strato nel piano ZX, calcolato per $\mu_c = 0, f = 0.9THz, \mu_c = 0.1, f = 1.4THz$ e $\mu_c = 0.2, f = 1.98THz$.

3.1. Antenna patch a dipolo

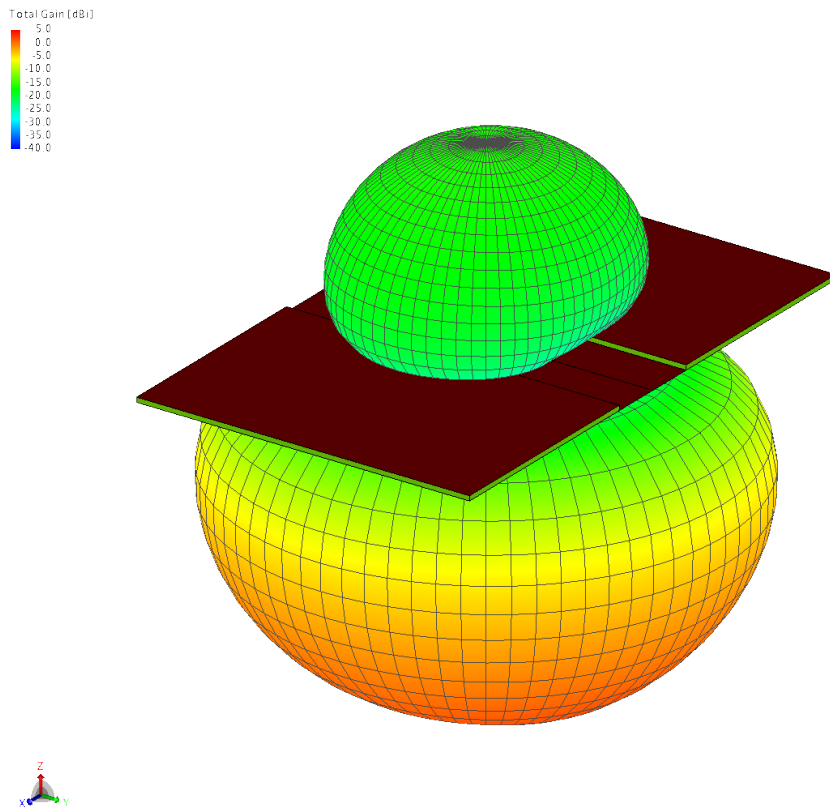
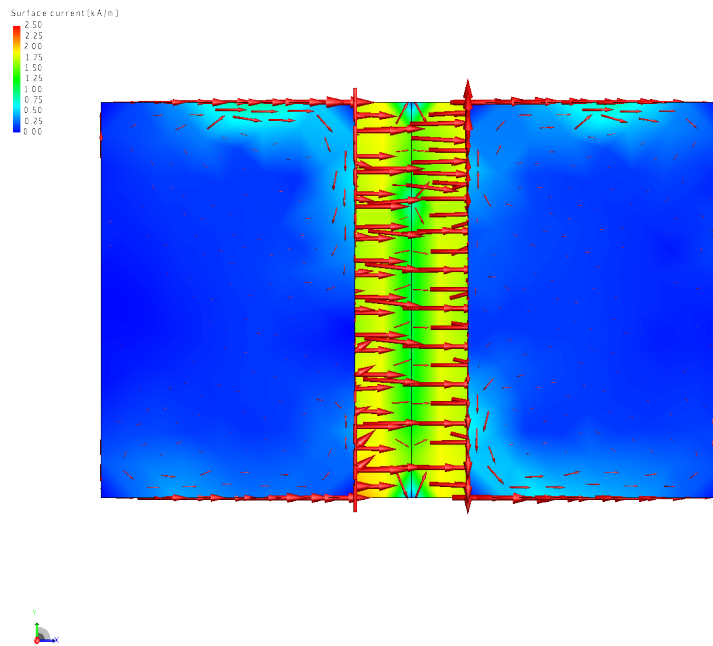
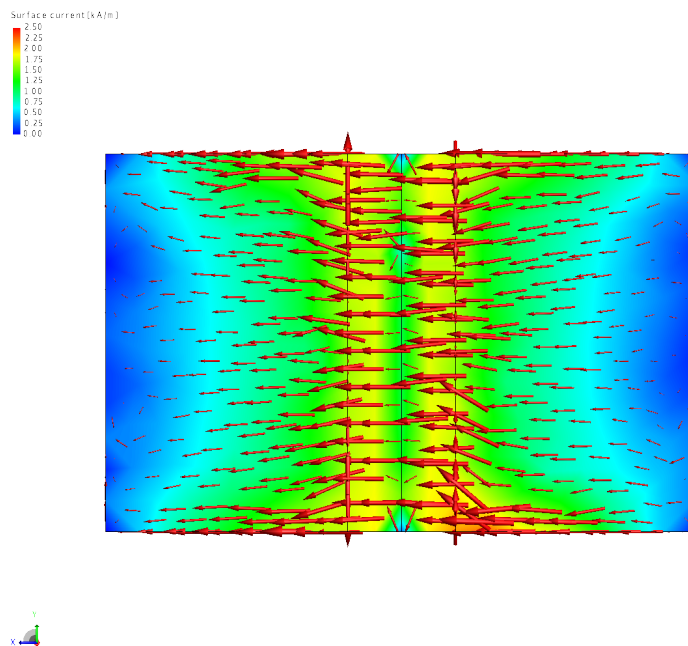


Figura 3.9: Diagramma di radiazione 3D (guadagno) dell'antenna a dipolo a doppio strato, calcolata per $\mu_c = 0.2$, $f = 1.98THz$.

3.1. Antenna patch a dipolo



(a) Vista dall'alto: layer superiore.



(b) Vista dal basso: layer inferiore.

Figura 3.10: Corrente superficiale in quadratura dell'antenna a dipolo a doppio strato, calcolata per $\mu_c = 0.2$, $f = 1.98THz$.

3.2 Antenna patch ad anello

In questa sezione sono riportate le simulazioni dell'antenna patch ad anello a singolo e doppio strato di grafene. I risultati sono rappresentati in termini d'impedenza d'ingresso, correnti superficiali, guadagno e diagramma di radiazione.

3.2.1 Antenna patch ad anello: singolo strato di grafene

La geometria è formata da una patch di grafene a forma di anello appoggiata sopra un substrato (GaAs) infinito nel piano XY e nel semispazio $Z < 0$, come mostrato in figura 3.11. Le dimensioni dell'anello sono descritte dal raggio superiore $R = 9.63\mu m$ e dal raggio inferiore $r = 4.4\mu m$.

Le simulazioni sono state calcolate per $\mu_c = 0$ e $\mu_c = 0.2$. I risultati ottenuti mostrano che questa geometria, in queste condizioni, non irradia efficientemente. Nella banda 0-4 THz non si trovano frequenze per cui l'antenna entra in risonanza. L'andamento dell'impedenza d'ingresso è mostrato

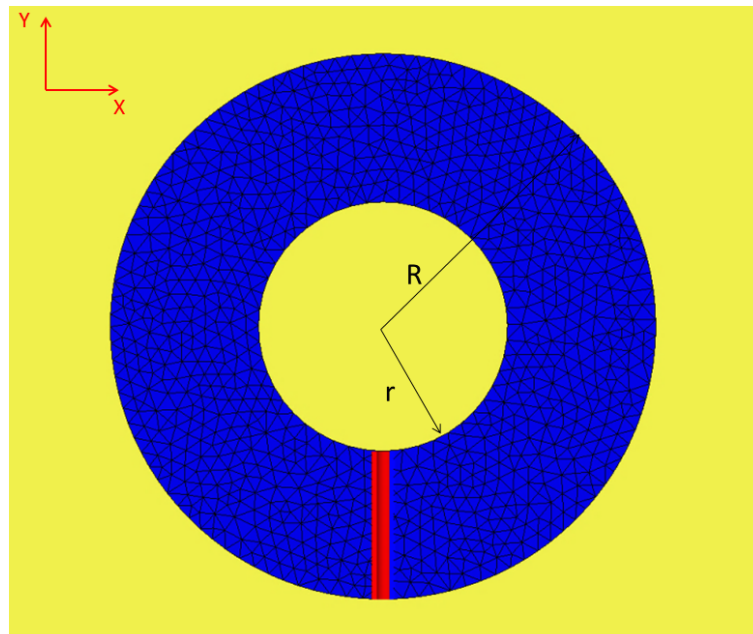


Figura 3.11: Antenna ad anello: vista frontale.

3.2. Antenna patch ad anello

in figura 3.12 in funzione della frequenza e al variare di μ_c . Il guadagno in funzione della frequenza, mostrato in figura 3.13, evidenzia che per $\mu_c = 0$ è al di sotto dei -25 dBi mentre per $\mu_c = 0.2$ non supera i -10 dBi. Come ci si aspetta, all'aumentare del potenziale chimico il guadagno migliora notevolmente; tuttavia questa antenna non raggiunge valori tali per cui possa essere usata nella banda 0-4 THz.

In tabella 3.1 e 3.2 vengono riassunti i parametri di simulazione e i risultati ottenuti in termini di frequenza di risonanza e guadagno massimo, rispettivamente.

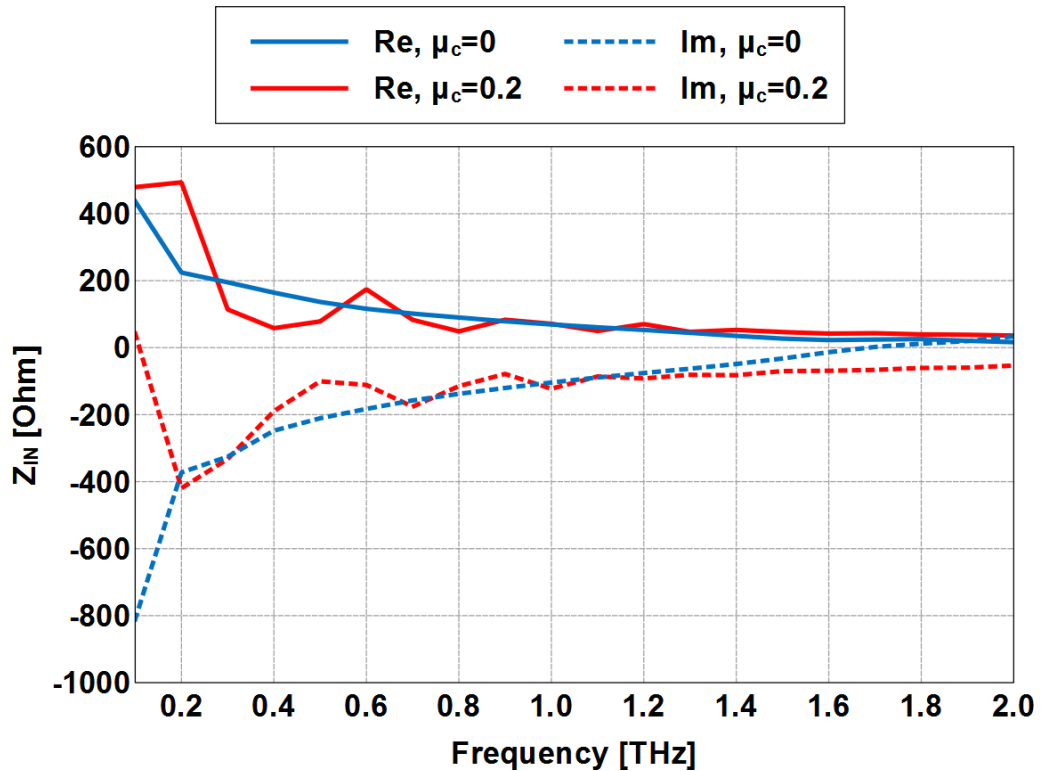


Figura 3.12: Parte reale e immaginaria dell'impedenza d'ingresso vista alla porta di alimentazione dell'antenna ad anello a singolo strato, calcolata per $\mu_c = 0$ e $\mu_c = 0.2$.

3.2. Antenna patch ad anello

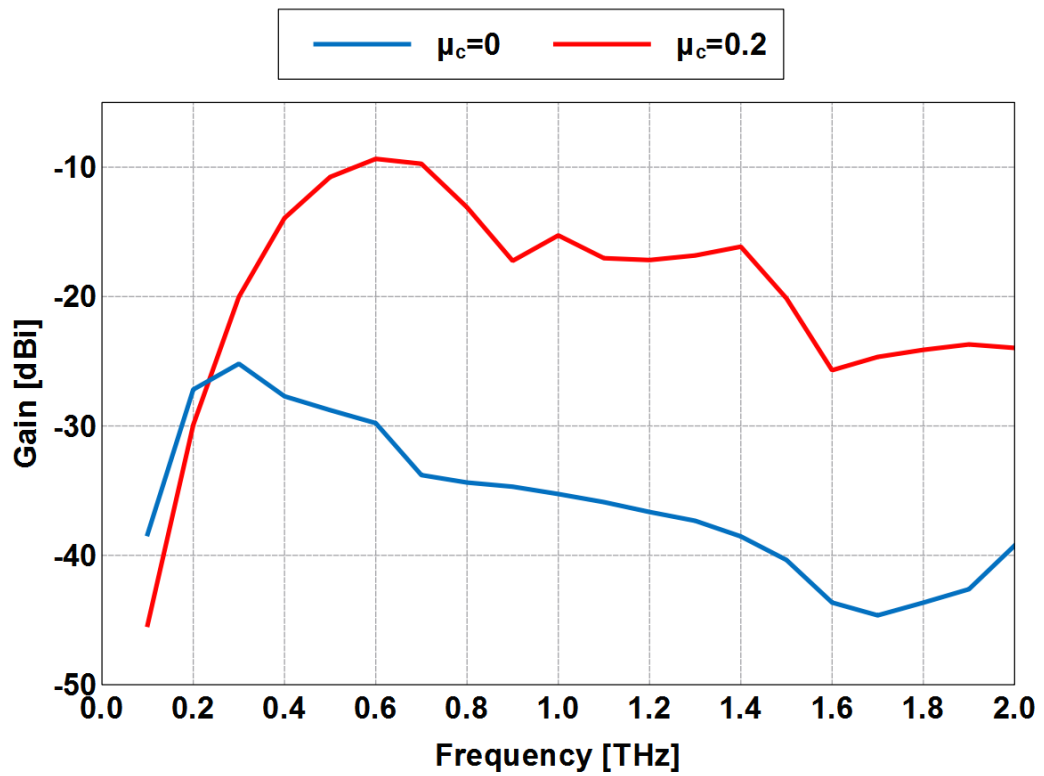


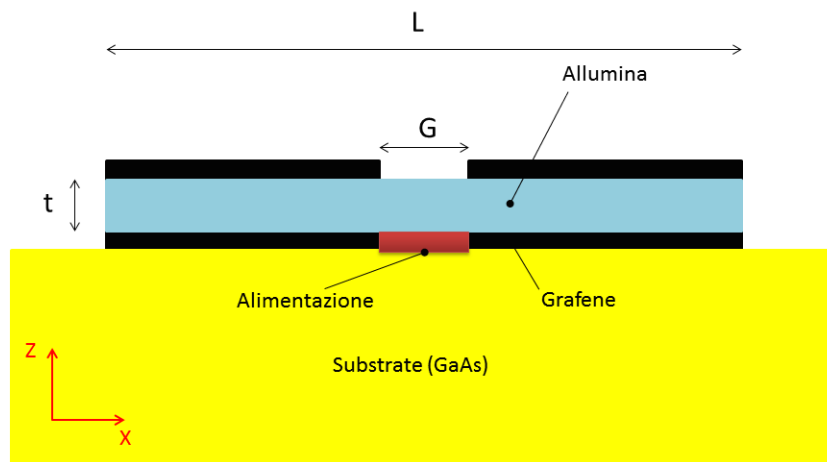
Figura 3.13: Guadagno in funzione della frequenza dell'antenna ad anello a singolo strato, calcolata per $\mu_c = 0$, $\mu_c = 0.2$ e $\theta = 180^\circ$.

3.2. Antenna patch ad anello

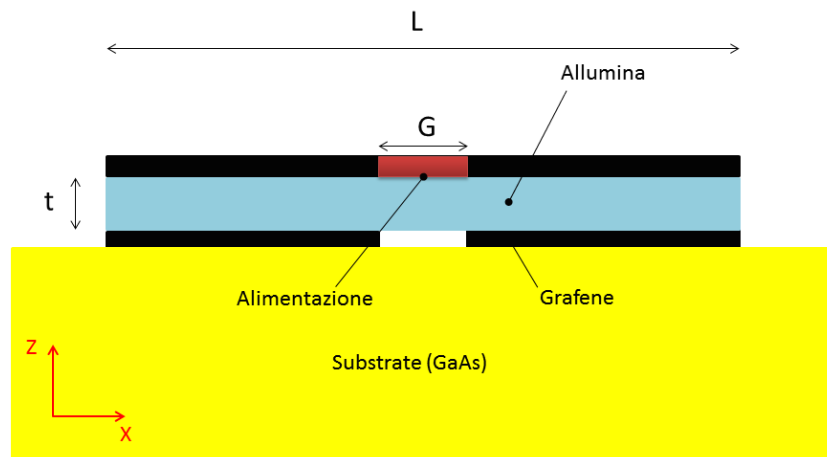
3.2.2 Antenna patch ad anello: doppio strato di grafene

La geometria ad anello a doppio strato è composta da due patch di grafene a forma di anello di dimensione $R = 9.63\mu m$, $r = 4.4\mu m$ e $t = 100nm$, come mostrato in figura 3.14. I parametri dei materiali utilizzati per il substrato e l'isolante sono gli stessi descritti nei sottocapitoli precedenti.

Le analisi di questa geometria sono state condotte per le tre configurazioni



(a) Vista laterale, configurazione con alimentazione in basso.



(b) Vista laterale, configurazione con alimentazione in alto.

Figura 3.14: Rappresentazione schematica della geometria dell'antenna ad anello a doppio strato di grafene.

3.2. Antenna patch ad anello

seguenti:

- a. alimentazione applicata all'anello inferiore, mentre l'anello superiore, in corrispondenza dell'alimentazione, ha un gap $G=250$ nm (figura 3.14(a)), $\mu_c = 0$;
- b. alimentazione applicata all'anello inferiore, mentre l'anello superiore, in corrispondenza dell'alimentazione, ha un gap $G=250$ nm (figura 3.14(a)), $\mu_c = 0.2$;
- c. alimentazione applicata all'anello superiore, mentre l'anello inferiore, in corrispondenza dell'alimentazione, ha un gap $G=250$ nm (figura 3.14(b)), $\mu_c = 0$;
- d. alimentazione applicata all'anello superiore, mentre l'anello inferiore, in corrispondenza dell'alimentazione, ha un gap $G=250$ nm (figura 3.14(b)), $\mu_c = 0.2$.

Il comportamento delle frequenze di risonanza è rappresentata dall'andamento dell'impedenza d'ingresso in funzione della frequenza: la configurazione a. risuona a $f=0.89$ THz, la configurazione b. risuona a 0.94 THz, la configurazione c. presenta due picchi di $Re(Z_{IN})$ a 1.05 e 1.23 THz, mentre la configurazione d. mostra gli stessi risultati di c. Riassumendo le frequenze di risonanza sono pari a

- a. 0.89 THz,
- b. 0.94 THz,
- c. $1.05/1.23$,
- d. come c.,

come mostrato in figura 3.15. I guadagni, calcolati nelle rispettive frequenze di risonanza e riferiti al piano ZX , come mostrato in figura 3.16, sono

- a. 1.7 dBi,
- b. 5.1 dBi,

3.2. Antenna patch ad anello

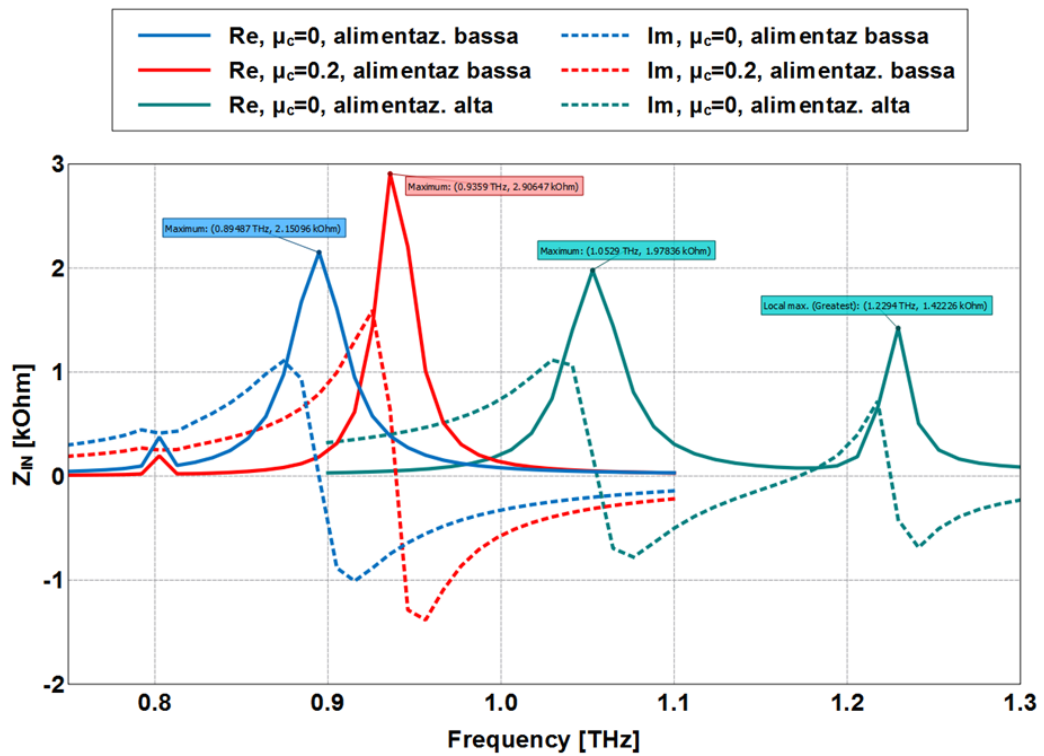


Figura 3.15: Impedenza d'ingresso nell'anello a doppio strato in funzione della frequenza, al variare di μ_c e del posizionamento della porta d'ingresso.

3.2. Antenna patch ad anello

c. 6/2.7 dBi,

d. circa come c.

In figura 3.16 è proposto un confronto dei guadagni d'antenna, nel piano ZX , nelle varie configurazioni analizzate. Si nota che il guadagno massimo della configurazione b. è molto simile a quella di c. nella prima risonanza. Mentre in c. nella seconda risonanza il guadagno diminuisce sensibilmente. Il pattern 3D del guadagno, riferito alla configurazione a., è mostrato in figura 3.17. Si osserva che, anche nella geometria ad anello, si ha simmetria nel piano azimutale. In figura 3.18 è mostrato l'andamento della corrente sulla superficie di grafene nelle configurazioni a. e c. Si nota che nella configurazione c., cioè quando l'alimentazione è applicata alla faccia superiore di grafene, la corrente è notevolmente maggiore in ampiezza. Questo giustifica i risultati di guadagno ottenuti. Infine è stata analizzata la geometria con alimentazione in alto e $\mu_c = 0.2$ (caso d.). I risultati, che per semplicità non sono riportati graficamente, sono quasi identici al modello c. Sembrerebbe che, in questo caso, il controllo sulla conducibilità non abbia effetto sul controllo delle caratteristiche propagative. Ma sarebbero necessari ulteriori studi per confermare tale ipotesi.

In tabella 3.1 e 3.2 vengono riassunti i parametri di simulazione e i risultati ottenuti in termini di frequenza di risonanza e guadagno massimo, rispettivamente.

Concludendo, si può affermare che l'antenna ad anello in configurazione a doppio strato di grafene raggiunge, nella banda inferiore di frequenze dei THz, ottime performance, migliori rispetto alle configurazioni a dipolo analizzate in questa tesi. Alto guadagno nella direzione di radiazione verso il substrato. Alta impedenza d'ingresso, la quale è un'ottima condizione, dato che i generatori di tensione nella banda dei THz (e.g. photomixer) hanno alte impedenze interne (nell'ordine dei $10k\Omega$). Omnidirezionalità nel piano azimutale.

3.2. Antenna patch ad anello

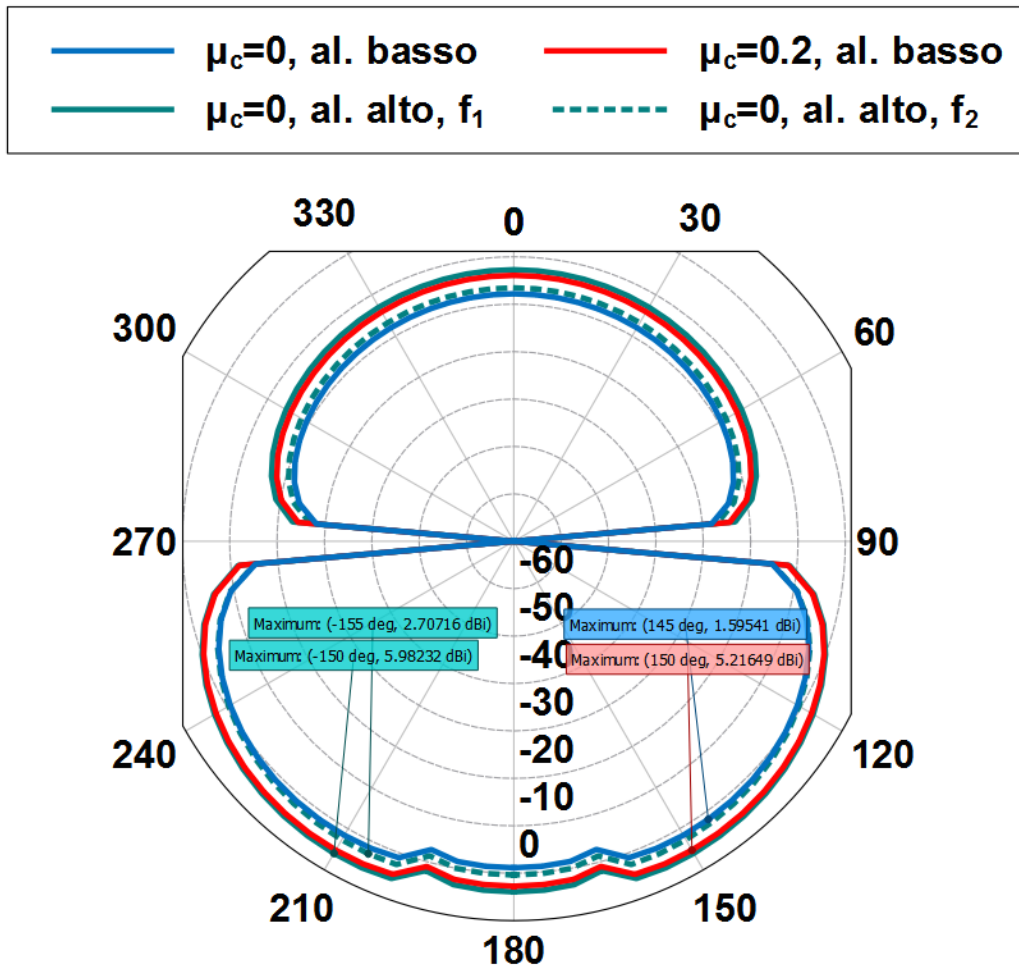


Figura 3.16: Guadagno nel piano ZX dell'antenna ad anello a doppio strato. Configurazioni con alimentazione in alto e in basso. f_1 e f_2 sono le due frequenze di risonanza che si ottengono nella configurazione con alimentazione in alto.

3.2. Antenna patch ad anello

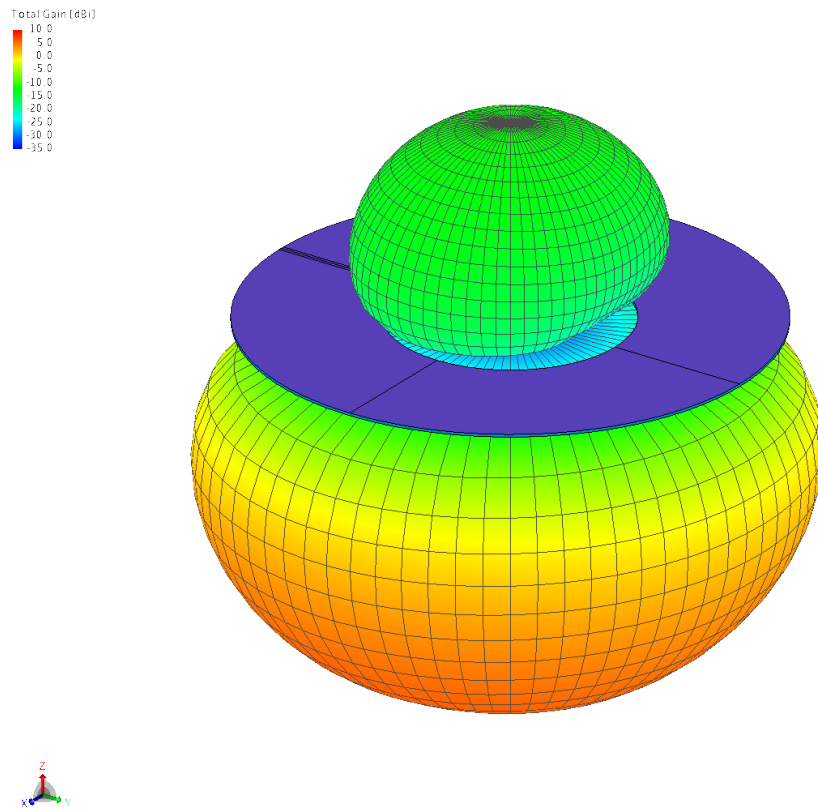
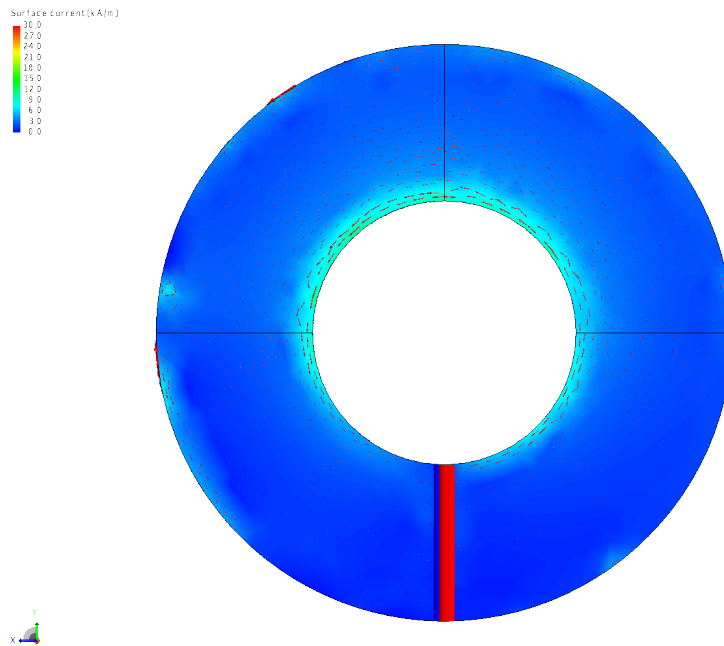
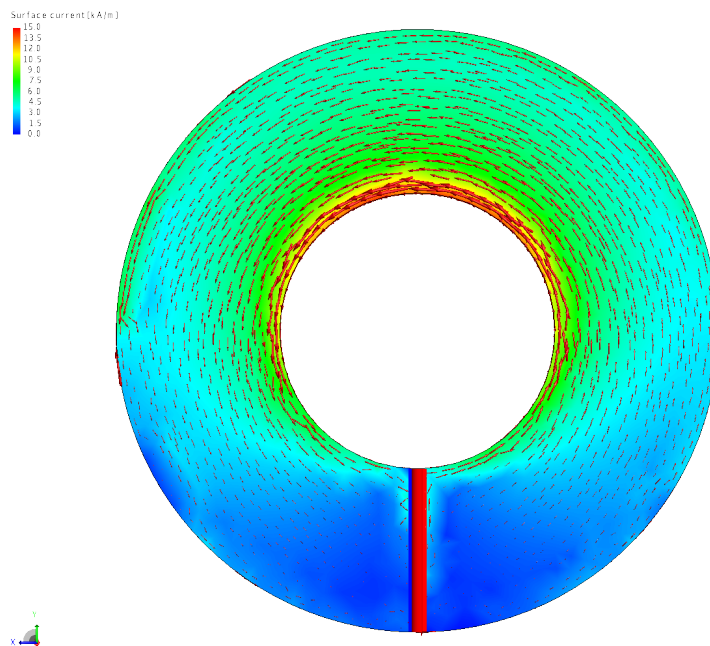


Figura 3.17: Guadagno 3D dell'antenna ad anello a doppio strato nella configurazione a.

3.2. Antenna patch ad anello



(a) Configurazione con alimentazione in basso.



(b) Configurazione con alimentazione in alto.

Figura 3.18: Corrente superficiale in quadratura nell'antenna ad anello a doppio strato, calcolata per $\mu_c = 0$.

3.2. Antenna patch ad anello

	Dimensioni [μm]						Grafene		
	W	L	G	t	R	r	$\tau[ps]$	T [K]	$\mu_c[eV]$
Dipolo singolo	7	9	2	-	-	-	1	300	0;0.2
Dipolo doppio	7	9	2	0.1	-	-	1	300	0;0.1;0.2
Anello singolo	-	-	0.25	-	9.63	4.4	1	300	0;0.2
Anello doppio	-	-	0.25	0.1	9.63	4.4	1	300	0;0.2

Tabella 3.1: Dimensioni e parametri usati nelle simulazioni.

	$\mu_c[eV]$	$f_r [THz]$	$Gain_{max}$ [dBi]
Dipolo singolo	0	0.49	-21
	0.1	n.d.	n.d.
	0.2	1.19	-6
Dipolo doppio	0	0.9	-12
	0.1	1.4	-4
	0.2	2	1.2
Anello singolo	0	indef.	<-25
	0.1	n.d.	n.d.
	0.2	indef.	<-10
Anello doppio ¹	0	0.89	1.7
	0.1	n.d.	n.d.
	0.2	0.94	5.1
Anello doppio ²	0	1.05/1.23	6/2.7
	0.1	n.d.	n.d.
	0.2	1.05/1.23	\sim 6/2.7

Tabella 3.2: Risultati simulazioni. Alimentazione in basso¹, alimentazione in alto².

Conclusioni

Lo scopo di questo lavoro di tesi è stato quello di studiare l'interazione delle onde elettromagnetiche, in una banda di frequenze intorno al THz, con nanostrutture a base di grafene.

Lo studio è stato diviso in due step. Il primo step è stato prettamente bibliografico. È stato ricavato il modello matematico di conducibilità superficiale, il quale modella uno strato bidimensionale di grafene. Da questo è stata ricavata la legge che mette in relazione l'andamento della conducibilità con un campo elettrostatico applicato. Sempre per quanto riguarda lo studio bibliografico, si sono studiati i modelli di antenne proposti in letteratura. Da questi si è capito come applicare un campo elettrico alla struttura in questione, secondo due possibili modalità: la prima prevede l'utilizzo di due strati di grafene separati da un dielettrico, il cui principio di funzionamento è molto simile a quello di un condensatore a facce piane parallele; il secondo prevede l'utilizzo di un singolo strato di grafene e diverse porte di silicio policristallino, in modo da modificarne la conducibilità localmente.

Le principali geometrie proposte in letteratura sono l'antenna patch a dipolo, l'antenna reflectarrays e l'antenna leaky-wave. L'antenna patch a dipolo in configurazione a doppio strato di grafene ha mostrato risultati interessanti in termini di riconfigurabilità in frequenza. Applicando una tensione d'ingresso si controlla il potenziale chimico μ_c . Variazioni di μ_c da 0 eV a 0.2 eV, ottenuti mediante tensioni di circa 3 V, mostrano uno shift della frequenza di risonanza da 0.8 a 1.8 THz, oltre che all'aumento dell'efficienza di radiazione di circa un 20%.

Nell'antenna reflectarrays è proposta una struttura ad array bidimensionale formata da patch di grafene (e substrati). Applicando opportunamente

Conclusioni

tensioni diverse alle righe di tale struttura è possibile variare, a frequenza fissata, il pattern di ricezione dell'antenna in modo dinamico, con un angolo di puntamento che varia in un range di 300° .

L'antenna leaky-wave si comporta in modo simile. La differenza sostanziale è che è formata da un'unica patch di grafene (e vari substrati). La modulazione sinusoidale della conducibilità avviene mediante una serie di porte, poste al di sotto del grafene, che applicano tensioni in modo indipendente le une dalle altre. Per capirne il concetto di funzionamento si pensi alle griglie di Bragg.

Il secondo step è stato di tipo sperimentale. Partendo dai modelli bibliografici, sono state ricreate alcune geometrie in un ambiente di simulazione, usando il software commerciale Feko.

La prima geometria analizzata in modo numerico è stata l'antenna patch a dipolo di dimensioni $9 \times 7 \mu m$. La struttura è molto simile a quella proposta in letteratura e, come si voleva dimostrare, i risultati ottenuti ricalcano molto bene quelli letterari. I dati risultanti dalle simulazioni mostrano che, per la patch a dipolo a singolo strato di grafene, una variazione del potenziale chimico da $\mu_c = 0$ a $\mu_c = 0.2$ trasla la risonanza da 0.49 a 1.19 THz mentre il guadagno massimo da -21 a -6 dBi, con un pattern simmetrico sul piano azimutale. Nel caso a doppio strato di grafene la stessa variazione del potenziale chimico provoca una traslazione della risonanza da 0.9 a 1.98 THz e il guadagno passa da -12.4 a 1.24 dBi.

La seconda geometria analizzata è stata l'antenna patch ad anello con raggi di dimensione $R = 9.63 \mu m$ e $r = 4.4 \mu m$. La configurazione a singolo strato non ha prodotto risultati consistenti. Dall'impedenza d'ingresso non si definisce un punto per cui si identifica la frequenza di risonanza. I guadagni sono inferiori a -10 dBi nel caso migliore. La configurazione a doppio strato, invece, ha prodotto risultati molto interessanti: con una variazione del potenziale chimico da 0 a 0.2 si ottiene riconfigurabilità in frequenza, passando da 0.89 a 1.05 THz (in termini di frequenza di risonanza) e guadagni massimi che vanno da 1.7 a 6 dBi, con un pattern simmetrico nel piano azimutale.

Concludendo si può affermare che antenne in grafene di dimensioni micro-metriche e geometricamente semplici, come patch a dipolo o ad anello, possono essere usate in trasmissioni wireless nella banda del THz. Le frequenze di

Conclusioni

funzionamento possono essere riconfigurate dinamicamente, in funzione della tensione applicata, e con buone efficienze di radiazione.

Ovviamente il risultato ottenuto da questo lavoro di tesi è solo l'input per ulteriori studi. Sviluppi futuri prenderanno in considerazione geometrie più complesse a cui potranno essere applicate tecniche realizzative efficaci.

Appendice A

Software di simulazione: Feko

Il MoM (Method of Moments) è una soluzione full-wave delle equazioni integrali di Maxwell nel dominio delle frequenze. Il vantaggio del MoM consiste nel fatto che è un “metodo a sorgente”. Significa che solo la struttura in questione è discretizzata e non lo spazio libero, come avviene nei “metodi a campo”. Le condizioni al contorno non devono essere impostate e i requisiti di memoria scalano in modo proporzionale con la dimensione della geometria in questione e con le frequenze di analisi.

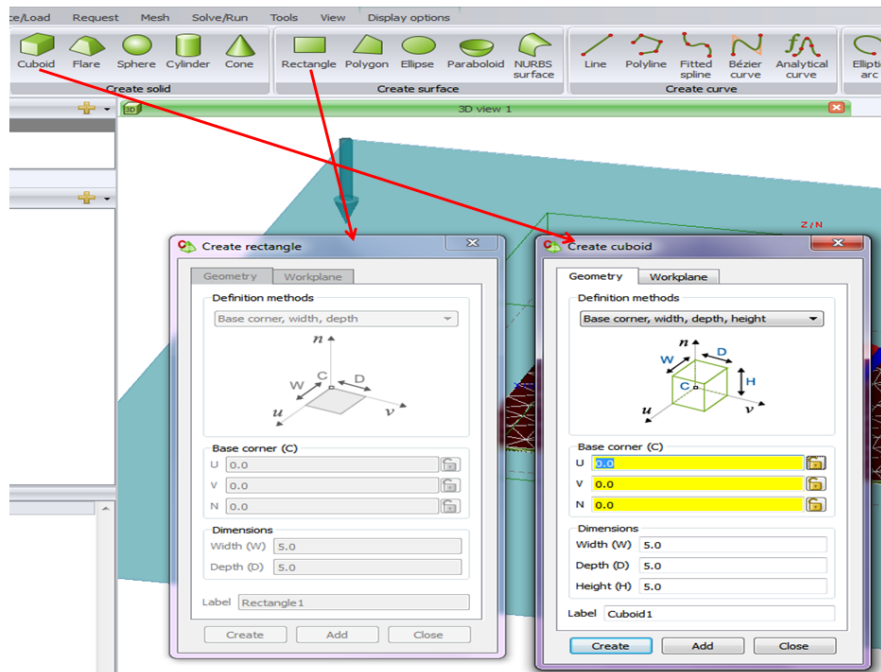
I dielettrici multistrato, e.g. substrati, sono modellati con la funzione di Green. In questo modo il substrato infinito non è discretizzato. Oggetti dielettrici di forma arbitraria sono modellati tramite SEP (Surface Equivalent Principle). Il SEP introduce correnti elettriche o magnetiche equivalenti sulla superficie di un corpo dielettrico. Questa superficie è discretizzata tramite triangoli.

Feko è un software commerciale di simulazione elettro-magnetica che usa diversi metodi di calcolo numerico, tra cui il MoM [11].

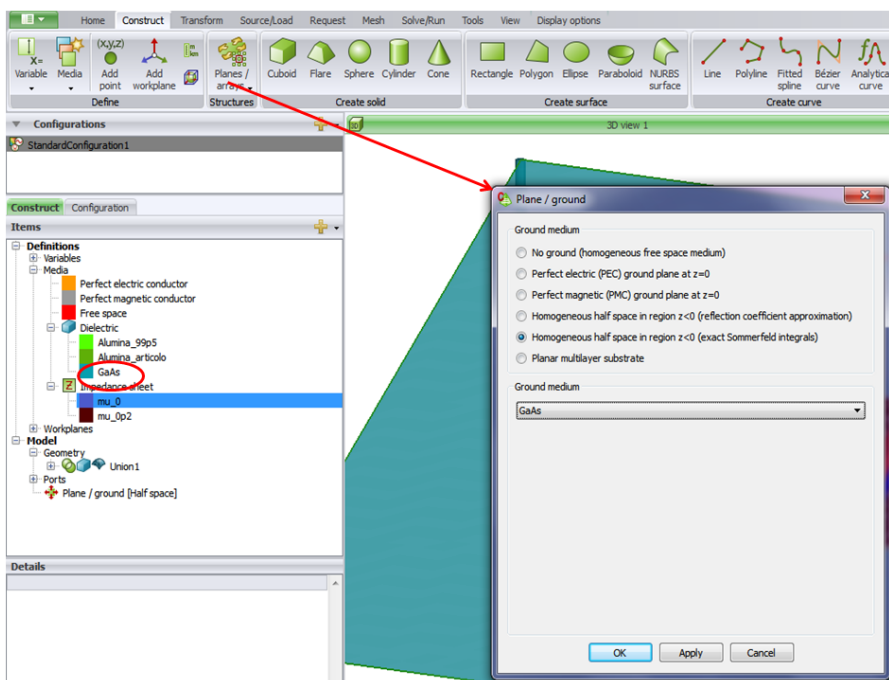
Di seguito si riporta sinteticamente come creare una geometria ed eseguire una simulazione con Feko.

Si prende come caso d’esempio il dipolo a doppio strato. Innanzi tutto si crea la struttura voluta. Essendo il grafene modellizzato come uno strato bidimensionale, si usa il comando *Rectangle*. In questo modo si crea una faccia a due dimensioni. Il parallelepipedo di allumina usato per distanziare le facce di grafene è ottenuto tramite il comando *Cuboid* (figura A.1(a)). Per

applicare una porta al centro della faccia, quest'ultima deve essere divisa. In questo modo è possibile applicare una porta con *Edge port* dal menù *Source/load*. Successivamente si crea il substrato tramite il comando *Plane/arrays* e gli si associa il materiale preventivamente creato (figura A.1(b)). Una volta conclusa la costruzione della geometria è necessario unire il tutto tramite il comando *Union*. Ora si imposta il foglio d'impedenza aprendo *Impedance sheet* e assegnando per ogni frequenza di analisi parte reale e immaginaria dell'impedenza del grafene. Per comodità si è creato uno script Matlab il quale a sua volta crea un file di testo opportunamente formattato, in modo da essere importato direttamente in Feko col comando *Import points* (figura A.2(a)). Si associa il tipo di materiale ad ogni faccia della struttura (figura A.2(b) sinistra). Infine si impostano le frequenze di analisi, che dovranno combaciare con quelle inserite nel foglio d'impedenza; si imposta la sorgente alla porta desiderata e poi in *Requests* si impostano le richieste delle simulazioni, come correnti, campo lontano (figura A.2(b) destra). Prima di mandare in esecuzione la simulazione bisogna discretizzare il modello tramite comando il *Mesh*.

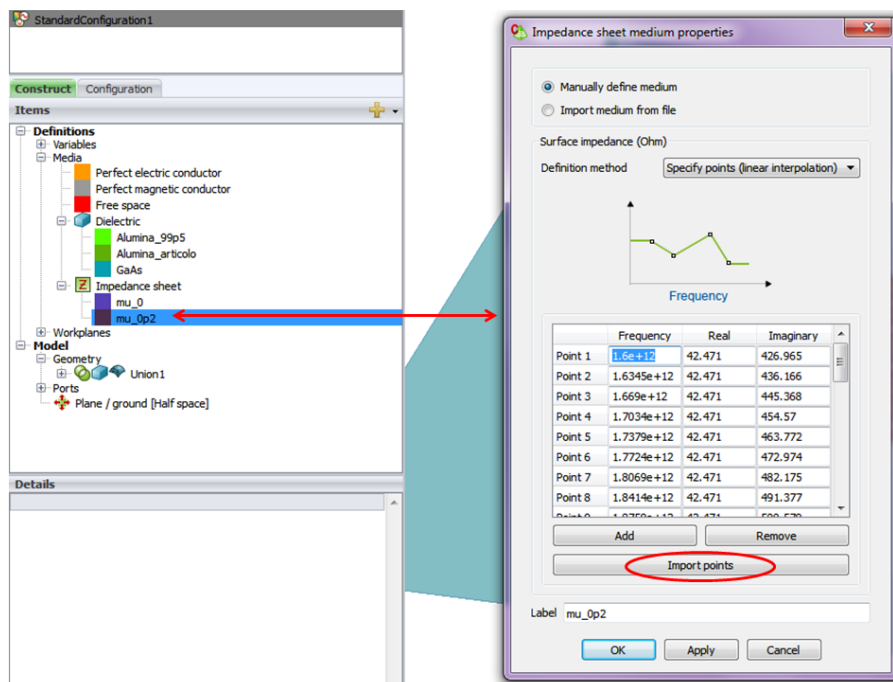


(a)

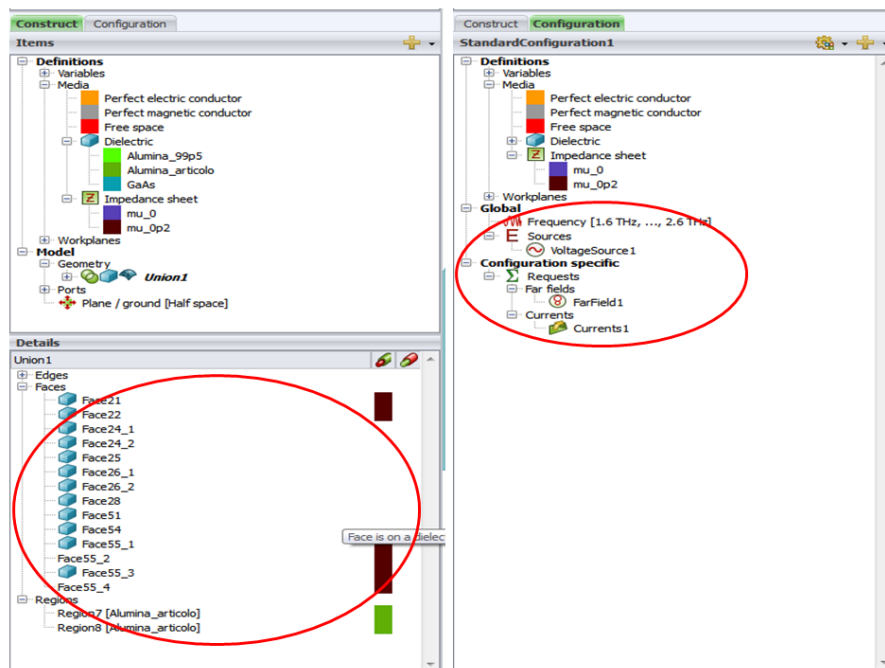


(b)

Figura A.1: Feko: creazione della struttura e applicazione del substrato.



(a)



(b)

Figura A.2: Feko: creazione del foglio d'impedenza, applicazione del materiale alla struttura e richiesta degli output.

Bibliografia

- [1] I. Llatser, S. Abadal, A. Mestres Sugranes, A. Cabellos-Aparicio, and E. Alarcòn. Graphene-enabled wireless networks-on-chip. In *Communications and Networking (BlackSeaCom), 2013 First International Black Sea Conference on*, pages 69–73, July 2013.
- [2] G.W. Hanson. Dyadic green’s functions for an anisotropic, non-local model of biased graphene. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 56(3):747–757, March 2008.
- [3] J.S. Gomez-Diaz, J.R. Mosig, and J. Perruisseau-Carrier. Surface plasmons on graphene sheets: Effect of spatial dispersion and magnetostatic bias. In *Antennas and Propagation (EuCAP), 2013 7th European Conference on*, pages 487–491, April 2013.
- [4] S. Abadal, E. Alarcòn, A. Cabellos-Aparicio, M. Lemme, and M. Nemirowsky. Graphene-enabled wireless communication for massive multi-core architectures. *Communications Magazine, IEEE*, 51(11):137–143, November 2013.
- [5] D.A.B. Miller. Rationale and challenges for optical interconnects to electronic chips. *Proceedings of the IEEE*, 88(6):728–749, June 2000.
- [6] M. Tamagnone, J.S. Gomez Diaz, J. Perruisseau-Carrier, and J.R. Mosig. High-impedance frequency-agile thz dipole antennas using graphene. In *Antennas and Propagation (EuCAP), 2013 7th European Conference on*, pages 533–536, April 2013.
- [7] M. Tamagnone, J.S. Gomez Diaz, J. Mosig, and J. Perruisseau-Carrier. Hybrid graphene-metal reconfigurable terahertz antenna. In *Microwave*

Bibliografia

- Symposium Digest (IMS), 2013 IEEE MTT-S International*, pages 1–3, June 2013.
- [8] Eduardo Carrasco, Michele Tamagnone, and Julien Perruisseau-Carrier. Tunable graphene reflective cells for thz reflectarrays and generalized law of reflection. *Applied Physics Letters*, 102(10):104103–104103–4, Mar 2013.
- [9] M. Esquiús-Morote, J.S. Gomez-Diaz, and J. Perruisseau-Carrier. Sinusoidally modulated graphene leaky-wave antenna for electronic beam-scanning at thz. *Terahertz Science and Technology, IEEE Transactions on*, 4(1):116–122, Jan 2014.
- [10] M. Tamagnone, J.S. Gomez-Diaz, J. R. Mosig, and J. Perruisseau-Carrier. Reconfigurable terahertz plasmonic antenna concept using a graphene stack. *Applied Physics Letters*, 101(21):214102–214102–4, Nov 2012.
- [11] Feko. <http://www.feko.info>, April 2014.