

MEMÓRIAS
DA
ACADEMIA DAS CIÊNCIAS
DE
LISBOA

CLASSE DE CIÊNCIAS

TOMO XLVI

**Manipulando a Radiação de
Terahertz usando Grafeno**

N. M. R. PERES



ACADEMIA DAS CIÊNCIAS
DE LISBOA

LISBOA • 2019

Manipulando a Radiação de Terahertz usando Grafeno

N.M.R. Peres¹

A região espectral compreendida, aproximadamente, entre os 0.3×10^{12} Hz e os 3×10^{12} Hz é por vezes designada por “hiato dos terahertz”. Um hiato é uma interrupção. No caso concreto, esta interrupção refere-se à inexistência de fontes de terahertz intensas e de detectores eficientes, o que não acontece nas outras regiões espectrais. Por outro lado, a região dos terahertz é muito interessante cientificamente e por diferentes razões. Desde logo, porque muitas moléculas possuem uma assinatura espectral específica nos terahertz. Tal permite a aplicação da radiação de terahertz ao diagnóstico de doenças, ao controlo da qualidade de produtos alimentares, à detecção de poluentes. Acresce ainda que este tipo de radiação transmite-se através de materiais opacos à radiação visível, sem ser tão energética quanto os raios-X. Como tal, aquele tipo de radiação encontra aplicações nas áreas do controlo de explosivos e estupefacientes através das fronteiras. Finalmente, a radiação de terahertz poderá vir a ser usada na comunicação espacial, em particular entre satélites, pois oferece a possibilidade de elevadas taxas de transmissão de informação. A aplicação da radiação de terahertz do espaço não sofre da desvantagem da sua aplicação na atmosfera, onde aquela é fortemente absorvida. Há assim razões suficientemente fortes para se desejar manipular a radiação de terahertz. Nesse sentido há uma necessidade real de desenvolvimento de componentes electro-ópticos passivos e activos nesta região espectral.

Um dos materiais mais promissores para o desenvolvimento de tais componentes electro-ópticos é uma folha de espessura atómica, composta exclusivamente por átomos de carbono, arrançados numa rede de favo de mel e que dá pelo nome de grafeno. Este material tem um espectro electrónico cónico e na sua forma neutra – forma na qual ocorre naturalmente – a energia de Fermi está localizada no vértice do cone; diz-se que neste caso o material está neutro. Devido à relação de dispersão electrónica linear, a densidade de estados é muito baixa quando comparada com a de um condutor convencional. Tal permite o controlo efectivo e em tempo real da energia de Fermi do material numa configuração de, e como exemplo, transístor de efeito de campo, onde a densidade electrónica é controlada pela existência da porta metálica do transístor, à qual é aplicada um certo potencial de porta. Quando o potencial de porta é diferente de zero, ocorre o preenchimento dos estados electrónicos ou por electrões ou por vazios, dependendo do sinal do potencial de porta e o material diz-se dopado e, portanto, condutor da corrente eléctrica uma vez que possui cargas eléctricas livres.

É bem conhecido que um condutor pode suportar oscilações colectivas de carga eléctrica – um plasma oscilando com uma certa frequência característica –, as quais se podem acoplar à radiação electromagnética, dando origem a um sistema híbrido designado por polaritão. Quando a radiação se acopla às oscilações colectivas de carga, o sistema híbrido toma o nome de polaritão-plasmónico. Em particular, este tipo de polaritão-plasmónico pode ocorrer na interface entre um dieléctrico e um metal,

¹ Universidade do Minho, Departamento de Física, 4710-057, Braga.

dando origem a um polaritão-plasmónico de superfície, uma excitação colectiva, onde carga e radiação estão acopladas entre si, e que se propaga ao longo da interface.

Como é fácil de entender o grafeno é inteiramente uma superfície a qual está naturalmente em contacto com o ambiente – na configuração mais simples de transistor de efeito de campo – e é suportado por um dieléctrico em cima do qual repousa. Não será pois de todo surpreendente reconhecer que na sua forma dopada o grafeno suporta polaritões-plasmónicos de superfície. Por outro lado, e como já se viu, é possível controlar a densidade electrónica no grafeno por via do potencial de porta na configuração de transistor de efeito de campo, pelo que a frequência de oscilação do plasma electrónico no grafeno pode ser controlada e ajustada para a região espectral de interesse, isto contrariamente ao caso de polaritões-plasmónicos de superfície em metais convencionais, onde a densidade electrónica está fixa e, portanto, não possuindo a propriedade útil de controlo da frequência de oscilação do plasma. Devido a isto (mas não só) a plasmónica em materiais convencionais está limitada à região espectral entre o infravermelho próximo e o ultravioleta, sendo a região do visível a mais explorada.

Uma propriedade importante dos polaritões-plasmónicos de superfície é a do confinamento da radiação electromagnética, o qual ocorre em regiões do espaço menores (ou mesmo muito menores) que o comprimento de onda de radiação da mesma frequência quando esta se propaga no vazio. Devido ao confinamento da energia electromagnética em regiões inferiores ao comprimento de onda da radiação livre, os polaritões-plasmónicos de superfície exibem valores elevados da intensidade do campo eléctrico. Na região dos terahertz, o confinamento dos polaritões-plasmónicos de superfície em metais convencionais é muito fraco, comportando-se aqueles, essencialmente, como radiação livre, perdendo por isso uma das vantagens importantes deste tipo de radiação. Resulta claro que desejando-se possuir um material que exiba ao mesmo tempo polaritões-plasmónicos de superfície na região espectral dos terahertz e com elevado confinamento espacial é necessário procurar para além dos metais convencionais. É neste contexto que surge o grafeno com um material plasmónico promissor na gama espectral dos terahertz.

Como já vimos anteriormente, é possível controlar a densidade electrónica no grafeno controlando a energia de Fermi do material, a qual pode tomar valores da ordem de 0.5 eV. Este valor, que deve ser comparado com a energia de Fermi dos metais convencionais, ~5.5 eV para a prata e para o ouro, e ~7 eV para o cobre, sugere que a frequência de plasma do grafeno deverá ser mais baixa que a frequência de plasma em metais convencionais. Efectivamente, a frequência dos polaritões-plasmónicos de superfície no grafeno ocorre entre o início dos terahertz e o fim infravermelho médio, isto é entre 0.3×10^{12} Hz e 100×10^{12} Hz, dependendo do valor da energia de Fermi. Como tal, também se espera que o grau de confinamento dos polaritões-plasmónicos de superfície nesta gama espectral seja muito superior à dos metais convencionais. Isso ocorre devido à forma da condutividade óptica do grafeno a qual é controlada pela relação de dispersão electrónica cónica que caracteriza o grafeno. Efectivamente, o grau de confinamento dos polaritões-plasmónicos de superfície – definido como o quociente entre o comprimento de onda da radiação no vácuo e o comprimento de onda do polaritão–, por via da dispersão cónica, é proporcional à constante de estrutura fina e ao quociente entre a energia de Fermi e o quadrado da frequência do polaritão-plasmónico, dando origem, para valores da energia de Fermi de 0.5 eV e para uma frequência de cerca de 100 THz a um grau de confinamento de cerca de 10^3 , um valor

verdadeiramente notável, que se traduz num volume de confinamento da energia electromagnética de cerca de 10^{-9} quando comparado com o cubo do comprimento de onda da radiação no vazio, para a mesma frequência.

O que os resultados anteriores mostram é que para uma dada frequência o número de onda de um polaritão-plasmónico de superfície é muito maior que o número de onda da radiação no vazio. Como tal, dispersão do polaritão-plasmónico encontra-se sempre à direita da dispersão da luz no vazio. Tal facto introduz um desencontro cinemático entre a radiação livre e o polaritão impedindo que este seja excitado directamente pela incidência de luz no material, seja este o grafeno ou um metal convencional. É portanto necessário encontrar mecanismos para vencer essa barreira cinemática. Afortunadamente, os mecanismos usados nos metais convencionais, como sejam o acoplamento com um prisma no regime de reflexão total e o acoplamento via uma rede de difracção, são também viáveis no caso do grafeno e têm sido usados por diversos grupos experimentais para induzir polaritões-plasmónicos de superfície no material.

Particularmente interessante, entre os mecanismos existentes para vencer a barreira cinemática, é a configuração de grelhas feitas de micro- ou nano-fitas de grafeno. Ou seja, o grafeno é micro-maquinado em formato de grelha constituindo assim a própria rede de difracção. Esta configuração foi a primeira a ser usada na excitação óptica de polaritões-plasmónicos de superfície neste material, demonstrando-se experimentalmente a existência deste tipo de excitação colectiva à temperatura ambiente, ao contrário do caso do gás electrões bidimensional na camada de inversão de uma heteroestrutura, na qual este tipo de excitação só é observável a muito baixas temperaturas, ~ 10 K. Torna-se evidente que o grafeno é um material viável para explorar efeitos plasmónicos à temperatura ambiente, condição essencial para que este sistema possa ser incorporado em tecnologia de uso rotineiro.

Apesar do que atrás se disse, a incorporação de estruturas plasmónicas baseadas em grafeno em tecnologia de optoelectrónica, requer distâncias de atenuação superiores às apresentadas por este material quando suportado por dióxido de silício, um componente típico na composição do transistor de efeito de campo à base de grafeno. Por esse motivo têm emergido novas arquitecturas baseadas nas heteroestruturas de Van der Waals baseadas em grafeno e nitreto de boro hexagonal. Este último material apresenta muito baixa rugosidade e elevada cristalinidade constituindo, por isso, uma plataforma ideal para encapsular o grafeno, criando, deste modo, um casulo no qual os polaritões-plasmónicos de superfície apresentam distâncias de propagação muito mais elevadas quando comparadas com a do grafeno em cima do dióxido de silício. É pois previsível que o futuro dos sistemas plasmónicos à base de grafeno para aplicações em optoelectrónica venha a ter como paradigma o encapsulamento do grafeno por cristais de nitreto de boro. Por outro lado, no que respeita à aplicação de estruturas plasmónicas à base de grafeno em sensores moleculares (incluindo biossensores), pelo menos uma das superfícies do grafeno tem que estar exposta ao ambiente, ou pelo menos estar à distância deste de umas poucas camadas de nitreto de boro, já que de outro modo se perderia a propriedade importante que explora o forte confinamento do polaritão à superfície do grafeno.

Seja como for, a investigação sobre as propriedades plasmónicas do grafeno tem sido intensa e assim deve continuar por um futuro próximo, em particular no que respeita à sua aplicação nas diversas áreas científicas e tecnológicas atrás referidas.

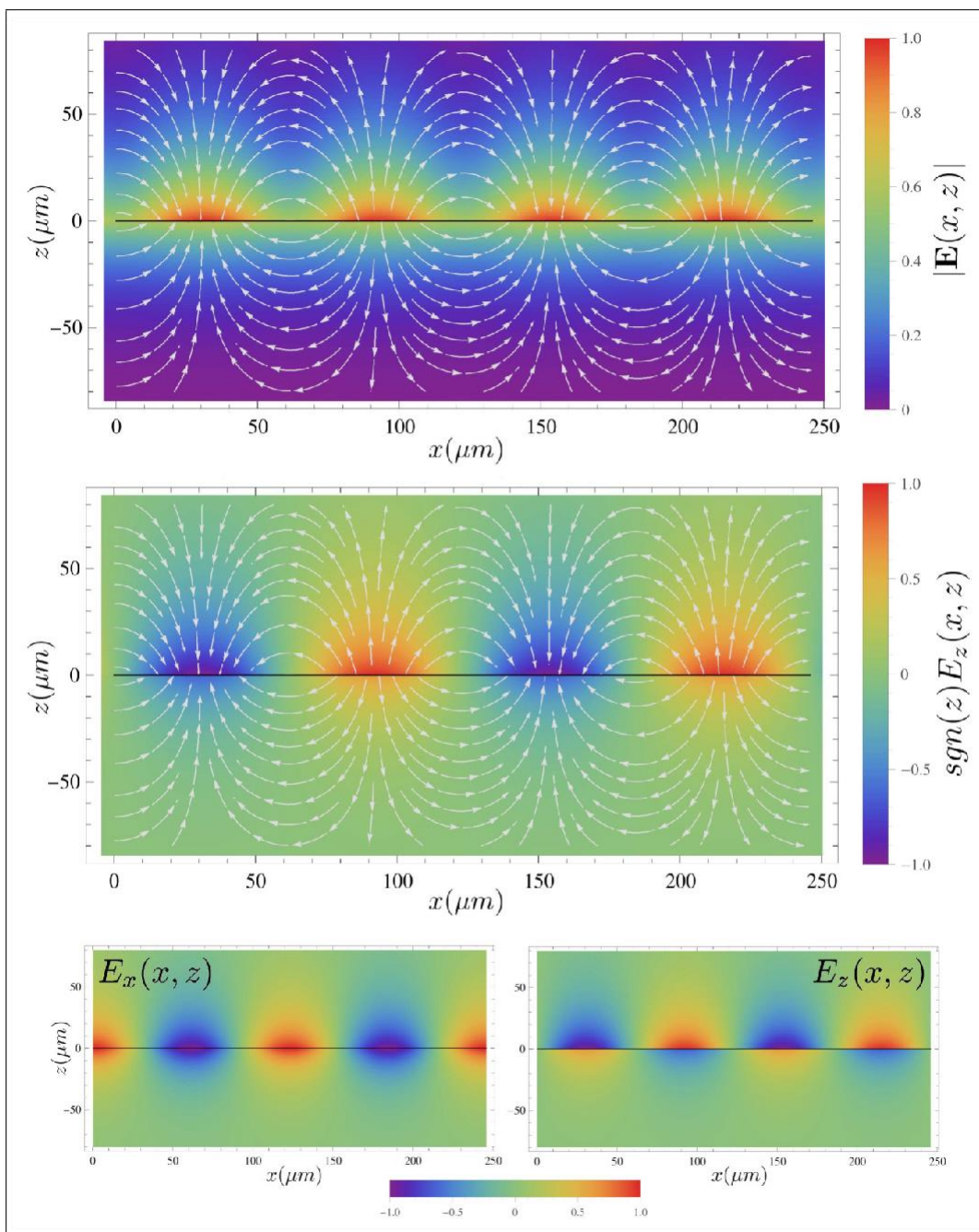


Figura 1
 Campo eléctrico dos polaritões-plasmónicos de superfície no grafeno.

(Comunicação apresentada à Classe de Ciências
 na sessão de 22 de janeiro de 2015)

BIBLIOGRAFIA

P.A.D. Gonçalves e N.M.R. Peres, *An Introduction to Graphene Plasmonics*, (World Scientific, Singapore, 2016).