

Diss. ETH No. 23648

Terahertz Spectroscopy of Two-Dimensional Nanostructures

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zürich)

presented by

FEDERICO VALMORRA

Dottore magistrale in Fisica, Alma Mater Studiorum
Università di Bologna (Bologna, Italy)

born on December 16, 1986
citizen of Italy

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Jérôme Faist, examiner
Prof. Dr. Thomas Ihn, co-examiner
Dr. Giacomo Scalari, co-examiner
Prof. Dr. Jérôme Tignon, co-examiner
Prof. Dr. Alessandro Tredicucci, co-examiner

2016

Summary

The terahertz energy range is delimited, on the low energy side, by high-frequency electronics and, on the high energy side, by long-wavelength optics and photonics. The THz-range then inherits specific features from both sides, making it very appealing for optoelectronics, science and technology.

This thesis deals with the spectroscopical investigation of several opto-electronical systems in the THz-frequency range. In particular, light-matter interaction is their common denominator. The different systems encompass electronic transitions, like inter-(sub-)band or Landau-level transitions in two-dimensional electron systems, and/or THz-cavities, like plasmonic waveguides or THz-split-ring resonators. The present work can be thus read following different paths.

From the point of view of basic physics, ultra-strong light-matter coupling is the main one. This relatively new regime of interaction has already been demonstrated in several different systems. In this thesis, building onto previous work on the ultra-strong coupling of the cyclotron transition in a GaAs-based 2DEG with THz-resonators, we enlarge such platform first towards a transport-based detection. To this aim, we make use of the phenomenon of microwave-induced resistance oscillations, allowing also the discussion of specific points of the proposed theories about its still unclear origin. Second, we study the interaction of graphene with the same THz-metasurface, both with and without magnetic field. When the latter system is in ultra-strong light-matter coupling, a Dicke phase transition had been predicted connected to its linear electronic dispersion.

Another important path deals with the spectroscopic investigation of the mentioned systems. The magneto spectroscopy of electronic transitions in THz-QCLs gives information on the different types of scattering present in the structure. The spectroscopy of dual metasurfaces coupled in the highly sub-wavelength near-field requires instead the discussion of optical complementarity and Babinet's principle from different angles. The spectroscopy of THz-resonators onto graphene provides more insights onto the modelling of the resonator itself.

Finally, from the point of view of optoelectronic devices, the magneto-spectroscopy of

THz-QCLs aims at providing additional information on the long-time issue of their maximum operating temperature, while graphene-based samples performed well as amplitude modulators of THz-radiation.

Sommario

L'intervallo di energie denominato "terahertz" è racchiuso, a basse energie, dall'elettronica ad alta frequenza, e, ad alte energie, dall'ottica e dalla fotonica a grande lunghezza d'onda. Per tal motivo, diverse caratteristiche dei due estremi precedenti confluiscono nella fisica del terahertz, rendendola molto interessante per l'opto-elettronica, e per la scienza e la tecnologia in generale.

Questo lavoro di tesi tratta dello studio spettroscopico di diversi sistemi opto-elettronici a frequenza terahertz. In particolare, l'interazione luce-materia è il loro comun denominatore. I diversi sistemi comprendono transizioni elettroniche, ad esempio transizioni inter-(sotto-)banda o tra livelli di Landau in gas di elettroni bidimensionali, e/o cavità terahertz, come guide d'onda plasmoniche o risonatori a base di metamateriali. Il presente manoscritto si appresta perciò ad essere letto seguendo diversi percorsi.

Dal punto di vista della fisica di base, il percorso di lettura principale segue l'accoppiamento ultra-forte tra radiazione e materia. Questo regime di interazione è relativamente nuovo ed è stato dimostrato in un certo numero di sistemi differenti. Questa tesi si fonda su lavori precedenti sull'accoppiamento ultra-forte tra la transizione di ciclotrone in gas di elettroni bidimensionali in GaAs con risonatori terahertz per ampliare il campo, prima di tutto in direzione della spettroscopia basata sul trasporto elettronico. A tal fine, verrà usato il fenomeno denominato "oscillazioni di resistenza indotte da microonde": le misure effettuate permetteranno anche la discussione di specifici problemi riguardo alla sua origine, ancora non chiara. Successivamente, la stessa metasuperficie di risonatori terahertz verrà studiata in interazione col grafene, sia in assenza sia in presenza di campo magnetico. Quando tale sistema entra nel regime di accoppiamento ultra-forte, ci si aspetta una transizione di fase di Dicke dovuta alla dispersione elettronica lineare del grafene.

Un altro percorso significativo segue lo studio spettroscopico dei sistemi menzionati. La spettroscopia in campo magnetico delle transizioni elettroniche nei laser terahertz a cascata quantica da informazioni sui diversi tipi di diffusione elettronica presenti nelle strutture. La spettroscopia di metasuperfici duali, interagenti nel campo prossimo a dis-

tanze molto più piccole della lunghezza d'onda, necessita e permette invece la discussione della complementarità ottica e del principio di Babinet da diverse prospettive. La spettroscopia dei risonatori terahertz realizzati sul grafene fornisce informazioni sul miglior modo per modellizzare i risonatori stessi.

Infine, dal punto di vista dei dispositivi opto-elettronici, la spettroscopia in campo magnetico dei laser terahertz a cascata quantica punta a fornire informazioni per affrontare il problema persistente della massima temperatura di lavoro dei dispositivi. Invece, i dispositivi a base di grafene danno ottimi risultati in termini di modulatori d'ampiezza di radiazione terahertz.