Резонансное детектирование терагерцового излучения в графеновых полевых транзисторах

Свинцов Д.¹, Бандурин Д.², Гайдученко И.³, Федоров Г.¹, Гейм А.²

¹ Московский физико - технический институт, Долгопрудный 141700, Институтский пер. 7

² Университет Манчестера, Манчестер M13 9PL, Великобритания

³ Московский государственный педагогический университет, Москва 119435, Мал. Пироговская 1

DOI 10.34077/Semicond2019-352

Полевые транзисторы с двумерным электронным каналом поддерживают плазменные колебания в терагерцовом (ТГц) диапазоне частот и могут использоваться для селективного детектирования излучения. Простейшей схемой резонансного детектора является полевой НЕМТ-транзистор, исток и затвор которого выведены на антенну, а постоянный фототок измеряется между стоком и истоком [1]. Несмотря на кажущуюся простоту идеи, до сих пор было представлено немного свидетельств резонансного детектирования в структурах на основе полупроводников $A_{III}B_V$ [2,3]. Значительные надежды на достижение резонансного отклика связывались с графеном благодаря высокой подвижности его носителей ($\sim 2 \times 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при гелиевой температуре). Однако в проведенных до сих пор экспериментах по ТГц детектированию в графене наблюдался лишь нерезонансный отклик [4,5].

В данном докладе будут представлены первые свидетельства плазмонно-резонансного детектирования ТГц (0.4 – 2.0 ТГц) излучения в транзисторах на основе двухслойного графена, инкапсулированного в нитрид бора [6]. Использование именно двухслойного графена и его инкапсуляция имеют принципиальное значение; оба фактора приводят к повышению времени релаксации электронного импульса и добротности плазмонного резонанса по сравнению с однослойным графеном. Резонансы в зависимости фоточувствительности от концентрации носителей заряда «выживают» до 77 К при частоте 2 ТГц, и остаются выраженными до частоты в 0.4 ТГц при $T=4$ К. Сравнение положений резонансов с теорией плазмонов в гейтированных двумерных системах дает хорошее согласие без подгоночных параметров. В образцах двухслойного графена, ориентированного на нитриде бора и образующего «муаровый узор», удастся наблюдать дополнительные резонансы, связанные с колебаниями электронов вблизи вторичных конусов Дирака в зонной структуре.

Анализ добротности, измеренной из экспериментальных спектров фоточувствительности, говорит о наличии дополнительных механизмов затухания плазмонов, помимо релаксации электронного импульса. Нами были оценены вклады в затухание плазмонов, связанные с электронной вязкостью [7], межзонным поглощением, утечкой носителей в металлические контакты и радиационным сопротивлением антенны. Последние два механизма соответствуют экспериментально наблюдаемому уширению резонансов при увеличении электронной плотности. Количественные оценки показывают, что именно радиационное сопротивление антенны дает основной вклад в ширину резонанса. Это приводит к компромиссу в задаче детектирования: увеличение радиационного сопротивления антенны приводит к пропорциональному увеличению фототока, но уменьшает добротность резонанса. Наличие оптимума в этом компромиссе и пути его преодоления будут обсуждаться в докладе.

Работа поддержана грантом РФФИ 18-37-20058.

[1] M. Dyakonov, M. Shur, *IEEE Trans. Electron Devices* **43**, 380 (1996)

[2] W.Knap, Y.Deng, S.Rumyantsev, M. Shur, *Appl. Phys. Lett.* **81**, 4637– 4639 (2002)

[3] V. Muravev, I. Kukushkin, *Appl. Phys. Lett.* **100**, 082102 (2012)

[4] L. Vicarelli et.al. *Nat. Mater.* **11**, 865 (2012)

[5] D. Bandurin et.al. *Appl. Phys. Lett.* **112**, 141101 (2018)

[6] D. Bandurin, D. Svintsov, I. Gayduchenko, S. G. Xu, A. Principi, M. Moskotin, I. Tretyakov, D. Yagodkin, S. Zhukov, T. Taniguchi, K. Watanabe, I. Grigorieva, M. Polini, G. Goltsman, A. Geim, G. Fedorov, *Nat. Commun.* **9**, 5392 (2018)

[7] D. Svintsov *Phys. Rev. B* **97**, 121405(R) (2018).