

**Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций**

На правах рукописи

Малый Владимир Сергеевич

**Отражательные свойства графеновых покрытий
в телекоммуникационном диапазоне**

Направление подготовки 03.06.01 Физика и астрономия

Код и наименование

Направленность 03.06.01_11 Лазерная физика

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Малый Владимир
Сергеевич

Научный руководитель: профессор,
д. ф.-м. н., Петров Виктор Михайлович

Санкт Петербург – 2019

Научно-квалификационная работа выполнена в высшей школе прикладной физики и космических технологий Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ/Зав.каф. :	<i>Величко Елена Николаевна, к.т.н., доцент ученая степень, ученое звание</i>
Научный руководитель:	<i>Петров Виктор Михайлович, д.ф.- м.н., профессор</i>
Рецензент:	<i>Козлов Сергей Аркадьевич, д.ф.-м.н., профессор, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО, декан Факультета фотоники и оптоинформатики</i>

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

1 Актуальность темы исследования

Графен является уникальным материалом, электронное возбуждение которого на частотах ниже нескольких эВ, демонстрирует линейное дисперсионное соотношение и описывается релятивистской квантовой электродинамикой.

Отражательная способность материала с графеновым покрытием рассматривается в данной работе, а также во множестве других, при использовании теоретического описания графена в квантовом поле в рамках модели Дирака. В этом описании используется тензор поляризации графена при ненулевой температуре в $(2 + 1)$ -мерном пространстве-времени.

Существует много работ, в которых содержатся рассчитанные коэффициенты отражения подложек с графеновым покрытием. Однако влияние, как ненулевой массовой щели, так и ненулевого химического потенциала на отражательные свойства покрытых графеном пластин не исследовано.

Изучение влияния вышеупомянутых параметров на отражательную способность материала, покрытого графеном, позволит применять подобные структуры в различном оборудовании, используемом в сфере телекоммуникаций.

2 Цель и задачи исследования

Целью работы является изучение влияния ненулевого химического потенциала, а также ненулевой массовой щели, на отражательные свойства покрытых графеном материалов при ненулевой температуре.

В ходе данной работы решаются следующие задачи:

- изучение влияния ненулевого химического потенциала, а также ненулевой массовой щели, на отражательные свойства покрытых графеном материалов;
- построение зависимостей;
- обоснование полученных результатов.

3 Научная новизна

Материалы, покрытые графеновым листом, представляют особый интерес для исследователей. Графеновые покрытия перспективны для оптической промышленности, производства различных детекторов, оптоэлектронных устройств, солнечных батарей, биосенсоров и т. д.

С использованием тензора поляризации ранее были исследованы подложки, покрытые чистым графеном, а также графеном с примесями. Тем не менее, совместное влияние ненулевых массовой щели и химического потенциала на отражательную способность материала до настоящего момента были не изучены.

4 Теоретическая и практическая значимость

Точные выражения, действительные при любой ненулевой температуре, для графена с ненулевой массовой щелью и химическим потенциалом, были получены только в работах некоторых авторов. Однако область применения полученного тензора поляризации была ограничена только мнимыми частотами Мацубары. Благодаря этому его можно было использовать для детального исследования эффекта Казимира, но не для расчета коэффициентов отражения и проводимости графена, которые должны быть определены на реальных частотах.

Полученные в данной работе зависимости отражательной способности от ненулевых параметров массовой щели и химического потенциала позволяют оценить влияние вышеупомянутых параметров и возможность применения подложек, покрытых графеном, в реальных устройствах.

5 Апробация работы

Результаты выполнения данной работы:

- опубликованы в статье «Reflectance of graphene-coated dielectric plates in the framework of Dirac model: Joint action of energy gap and chemical potential» в Journal of Physics: Condensed Matter;

- на конференции International Summer School-Conference “Advanced Problems in Mechanics” в 2019 году.

6 Публикации

Список опубликованных работ:

1. Malyi V., Korikov C., Petrov V. Graphene-coated substrate as a basis for nano-antennae // Proceedings of Conference on Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. ruSMART 2018, NEW2AN 2018. Lecture Notes in Computer Science, Galinina O., Balandin S., Koucheryavy Y. (eds), (Springer, Cham, 2018) pp. 656-665, LNCS, volume 11118, 2018 (DOI: 10.1007/978-3-030-01168-0_60) Scopus.

2. V.S. Malyi, V.M. Mostepanenko, G.L. Klimchitskaya, V.M. Petrov, Reflective properties of graphene for optical and near-infrared wavelength range // 2018 International Conference Laser Optics (ICLO). St. Petersburg, Russia, 4-8 June 2018 (DOI: 10.1109/LO.2018.8435805, ISBN: 978-1-5386-3612-1).

3. G.L. Klimchitskaya, V.S. Malyi, V.M. Mostepanenko, V.M. Petrov. Reflectance of graphene-coated dielectric plates in the framework of Dirac model: Joint action of energy gap and chemical potential // Journal of Physics: Condensed Matter, 2019 IOP Publishing (DOI: 10.1088/1361-648X/ab4000).

4. Malyi V., Ryzhih N., Rudnitskih D., Petrov V. Influence of material parameters on the reflective properties of a dielectric substrate coated with graphene. // 2019 International Summer School-Conference “Advanced Problems in Mechanics”.

5. Мальный В.С., Петров В.М. Изучение отражательных свойств подложек, покрытых графеном // Неделя науки СПбПУ: материалы научного форума с международным участием. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. - СПб.: Изд-во Политехн, ун-та, 2018. С. 99-102 РИНЦ

7 Основное содержание НКР

7.1 Обзор литературы и методы исследования

В последнее время большое количество посвящено исследованиям отражательной способности графена. В основном в качестве образцов материалов рассматриваются случаи с идеальным, безпримесным листом графена. В части исследований изучается влияние только одного из основных параметров графенового листа – химического потенциала или массовой щели.

В данной работе впервые были произведены комплексные исследования влияния основных параметров реального листа графена, который имеет ненулевой химический потенциал и параметр массовой щели. Зависимости отражательной способности от параметров массовой щели и химического потенциала позволяют оценить изменения, происходящие при тех или иных значениях. Для разработчиков реальных устройств оптоэлектроники, наномантенн, биосенсоров и т.д. результаты, полученные в данной работе, позволят производить усовершенствования ранее использованных устройств путем модернизации структур, конфигурации материалов и т.п.

Была рассмотрена достаточно толстая диэлектрическая пластина, которую можно считать полупространством, покрытое графеном с ненулевой массовой щелью, обладающим некоторым химическим потенциалом μ . Хорошо известно, что для чистого графена массовая щель в спектре квазичастиц $\Delta = 0$, но под влиянием дефектов структуры, электрон-электронного взаимодействия и при наличии подложки возрастает до 0.1 или 0,2 эВ. Что касается химического потенциала, он описывает концентрацию легирования, которая является ненулевой для любого реального образца графена и принимает типичные значения $\mu \sim 0,1$ эВ. Были рассмотрены только случай нормального падения, так что проекция волнового вектора на графеновую плоскость $k = 0$. Из-за этого достаточно рассмотреть только поперечные магнитные (ТМ), то есть p -поляризованные, электромагнитные волны частоты ω , падающие на пластину с графеновым покрытием.

Зависимости получены при значениях температуры $T = 300, 77, 4.4$ К при помощи компьютерного моделирования.

7.2 Полученные результаты

В данной главе будут представлены результаты компьютерного моделирования.

На рис. 1 (а, б, с) показаны коэффициенты отражения пластины из диоксида кремния, покрытой графеном, при нормальном падении в зависимости от химического потенциала при $T = 300, 77, 4.4$ К, соответственно. Здесь видно, что отражательная способность уменьшается с увеличением массовой щели.

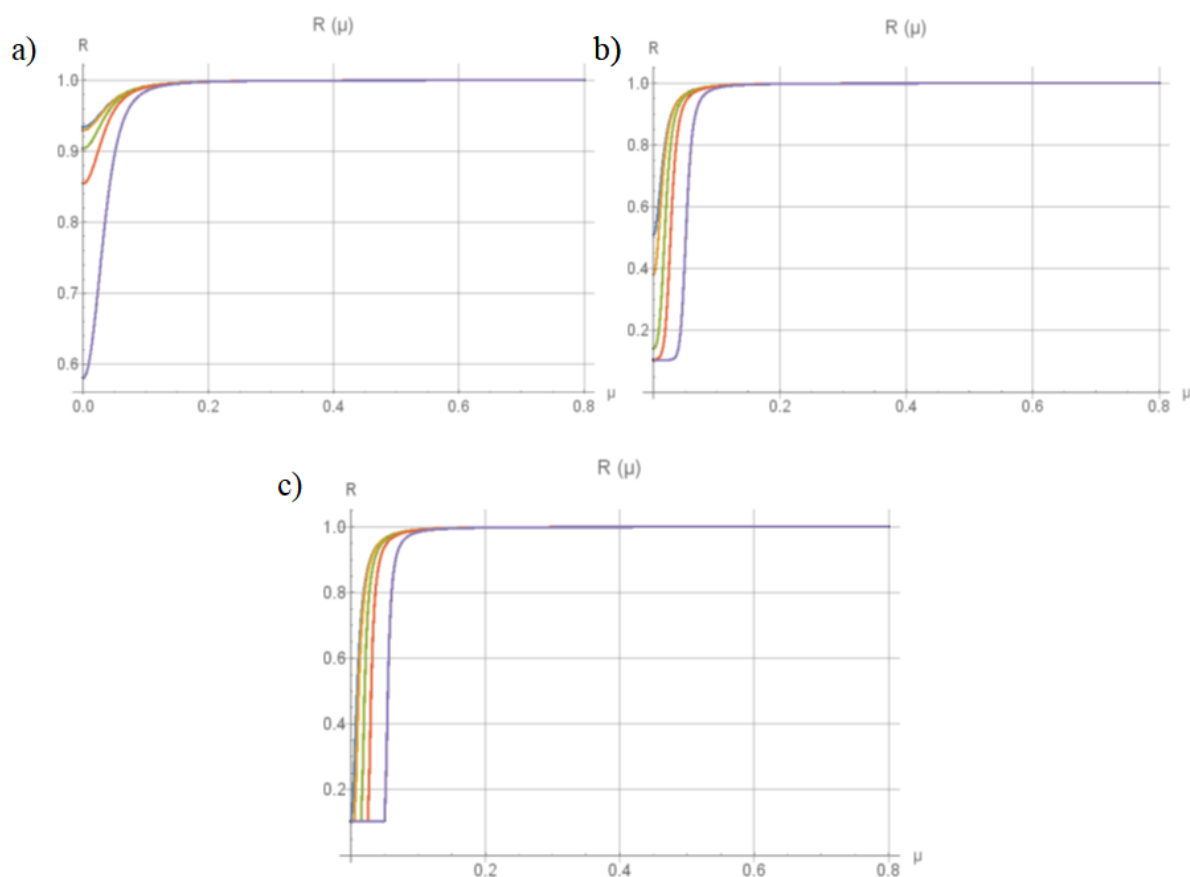


Рис. 1. Коэффициент отражения пластины SiO_2 с графеновым покрытием при нормальном падении в зависимости от химического потенциала для $\hbar\omega = 0,1$ мэВ при (а) $T = 300$ К, (б) $T = 77$ К, (с) $T = 4,4$ К (синяя линия - $\Delta = 0$, оранжевая линия - $\Delta = 0,01$, зеленая линия - $\Delta = 0,03$, красная линия - $\Delta = 0,05$, фиолетовая линия - $\Delta = 0,1$).

На рис. 2 (а, b, с) показаны коэффициенты отражения пластины из диоксида кремния, покрытой графеном, при нормальном падении как функции химического потенциала для $\hbar\omega = 1$ мэВ при $T = 300, 77, 4,4$ К, соответственно. Отражательная способность немного уменьшается с увеличением массовой щели.

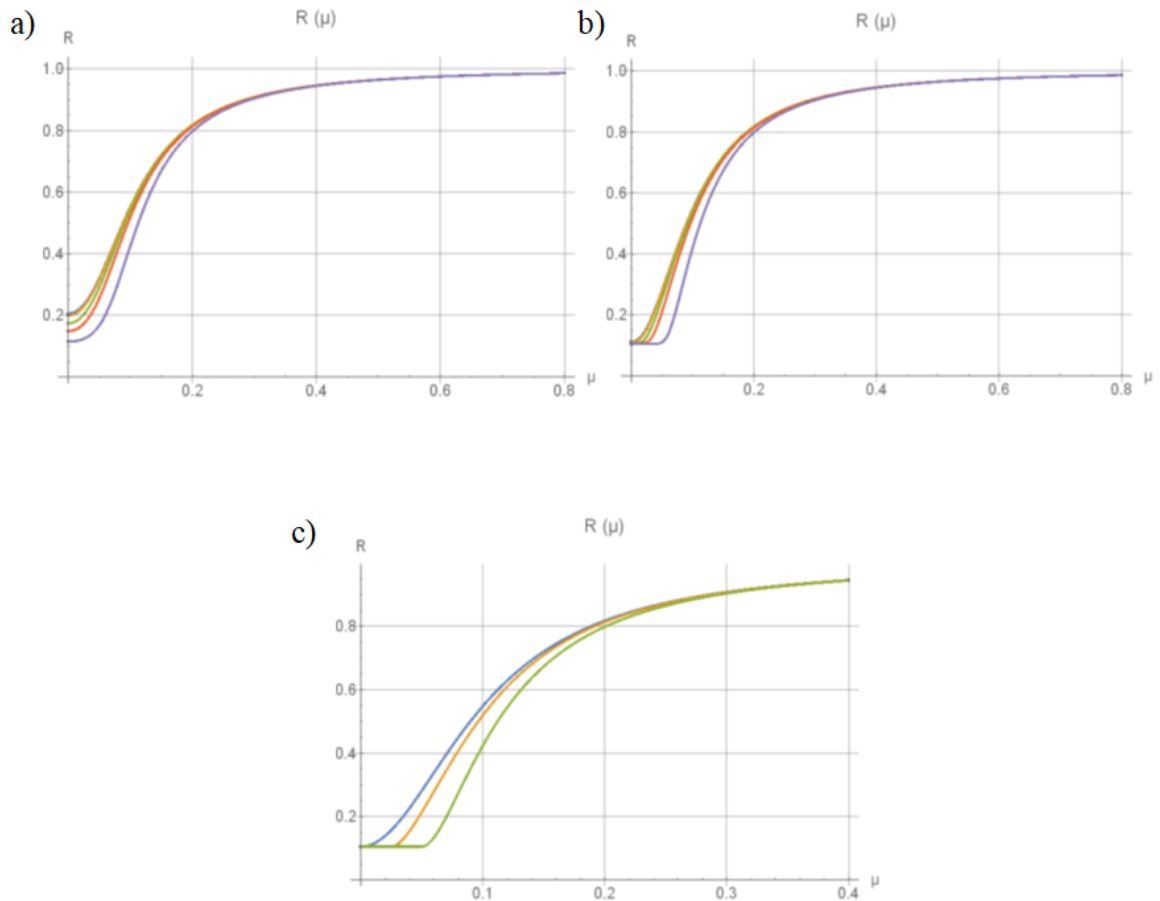


Рис. 2. Коэффициент отражения пластины SiO_2 с графеновым покрытием при нормальном падении в зависимости от химического потенциала для $\hbar\omega = 1$ мэВ при (а) $T = 300$ К, (b) $T = 77$ К, (с) $T = 4.4$ К (для 2 (а) и 2 (b) синяя линия - $\Delta = 0$, оранжевая линия - $\Delta = 0,01$, зеле-ная линия - $\Delta = 0,03$, красная линия - $\Delta = 0,05$, фиолетовая линия - $\Delta = 0,1$; для 2 (с) синяя линия - $\Delta = 0$, оранжевая линия - $\Delta = 0,05$, зеленая линия - $\Delta = 0,1$).

На рис. 3 (а, b, с) показаны коэффициенты отражения пластины из диоксида кремния, покрытой графеном, при нормальном падении в зависимости от химического потенциала для $\hbar\omega = 10$ мэВ при $T = 300, 77, 4,4$ К, соответственно. Чем выше частота, тем меньше коэффициент отражения зависит от массовой щели.

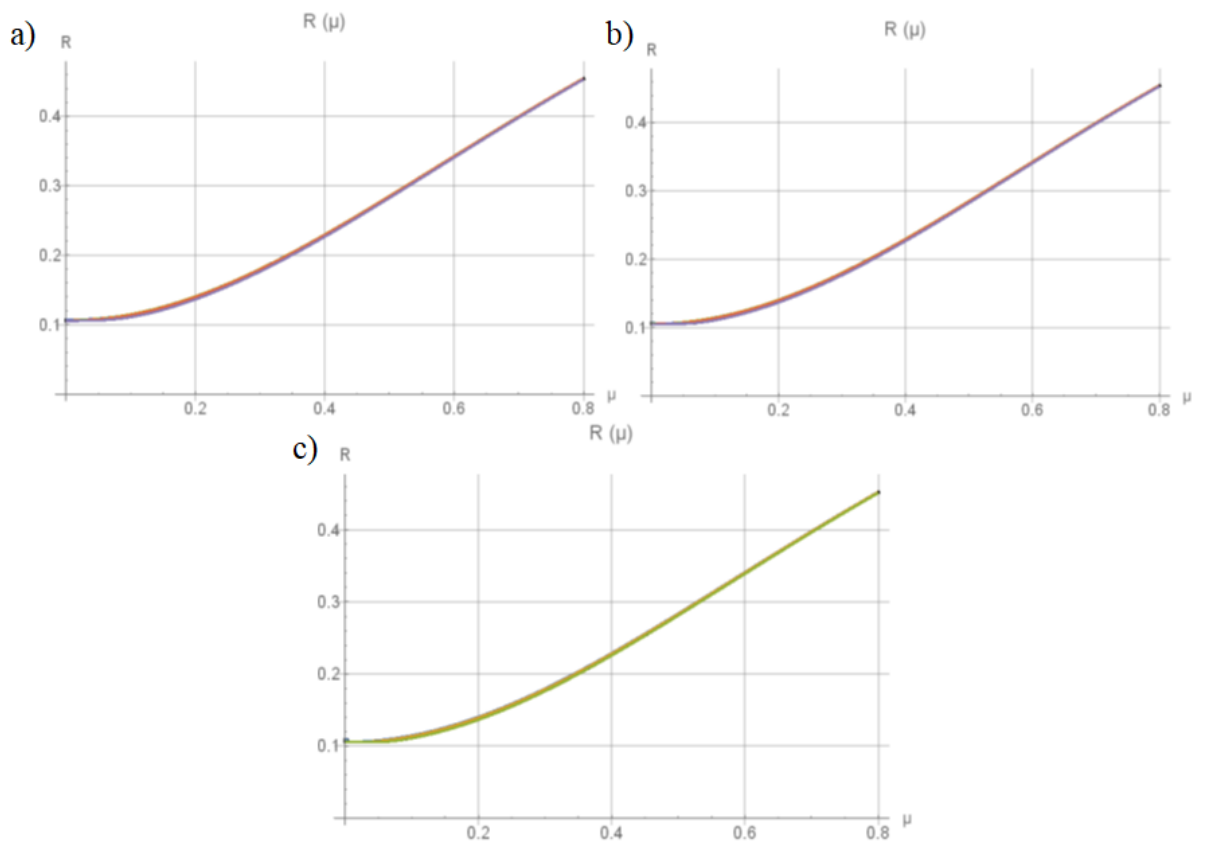


Рис. 3. Коэффициент отражения пластины SiO_2 с графеновым покрытием при нормальном падении в зависимости от химического потенциала для $\hbar\omega = 10$ мэВ при (a) $T = 300$ К, (b) $T = 77$ К, (c) $T = 4.4$ К (для 3 (a) и 3 (b) синяя линия - $\Delta = 0$, оранжевая линия - $\Delta = 0,01$, зеленая линия - $\Delta = 0,03$, красная линия - $\Delta = 0,05$, фиолетовая линия - $\Delta = 0,1$; для 3 (c) синяя линия - $\Delta = 0$, оранжевая линия - $\Delta = 0,05$, зеленая линия - $\Delta = 0,1$).

На рис. 4 (a, b, c) показаны коэффициенты отражения пластины из диоксида кремния, покрытой графеном, при нормальном падении в зависимости от массовой щели для $\hbar\omega = 0,1$ мэВ при $T = 300, 77, 4,4$ К, соответственно. Коэффициент отражения увеличивается с увеличением химического потенциала.

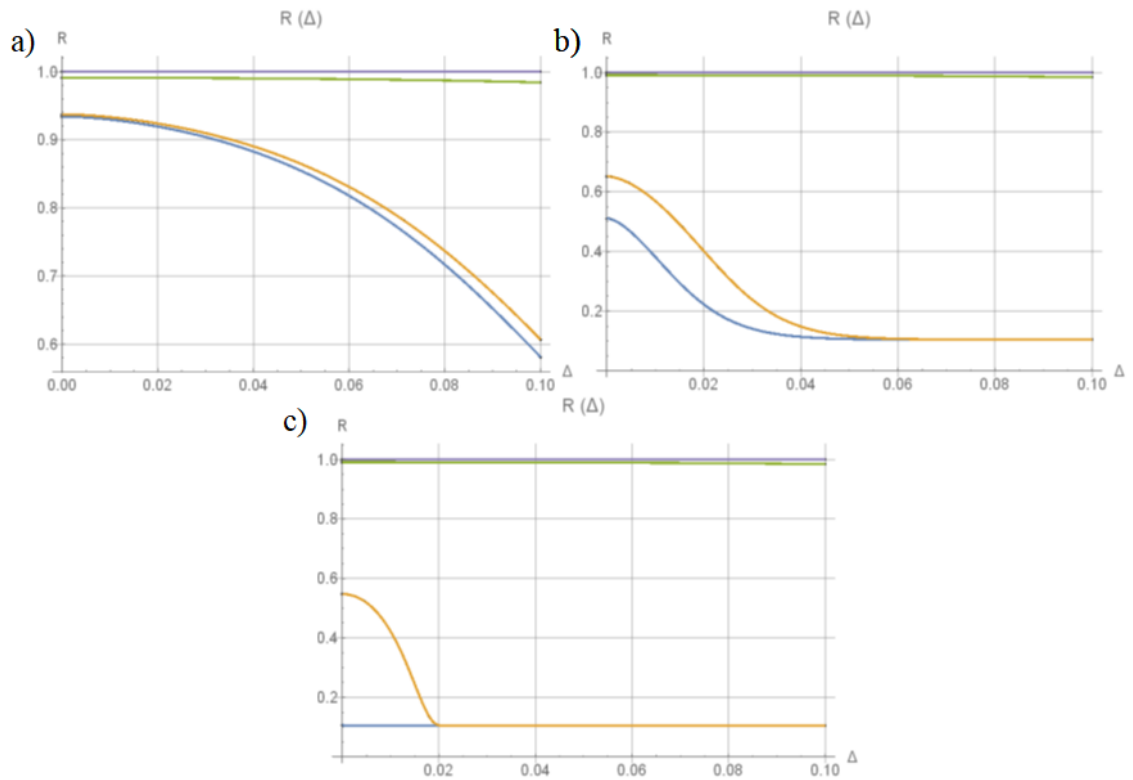


Рис. 4. Коэффициент отражения пластины SiO_2 с графеновым покрытием при нормальном падении как функции массовой щели для $\hbar\omega = 0,1$ мэВ при (а) $T = 300$ К, (б) $T = 77$ К, (с) $T = 4,4$ К (синяя линия - $\mu = 0$, оранжевая линия - $\mu = 0,01$, зеленая линия - $\mu = 0,1$, красная линия - $\mu = 0,5$, фиолетовая линия - $\mu = 0,8$).

На рис. 5 (а, б, с) показаны коэффициенты отражения пластины из диоксида кремния, покрытой графеном, при нормальном падении как функции массовой щели для $\hbar\omega = 1$ мэВ при $T = 300, 77, 4,4$ К, соответственно. Коэффициент отражения увеличивается с увеличением химического потенциала.

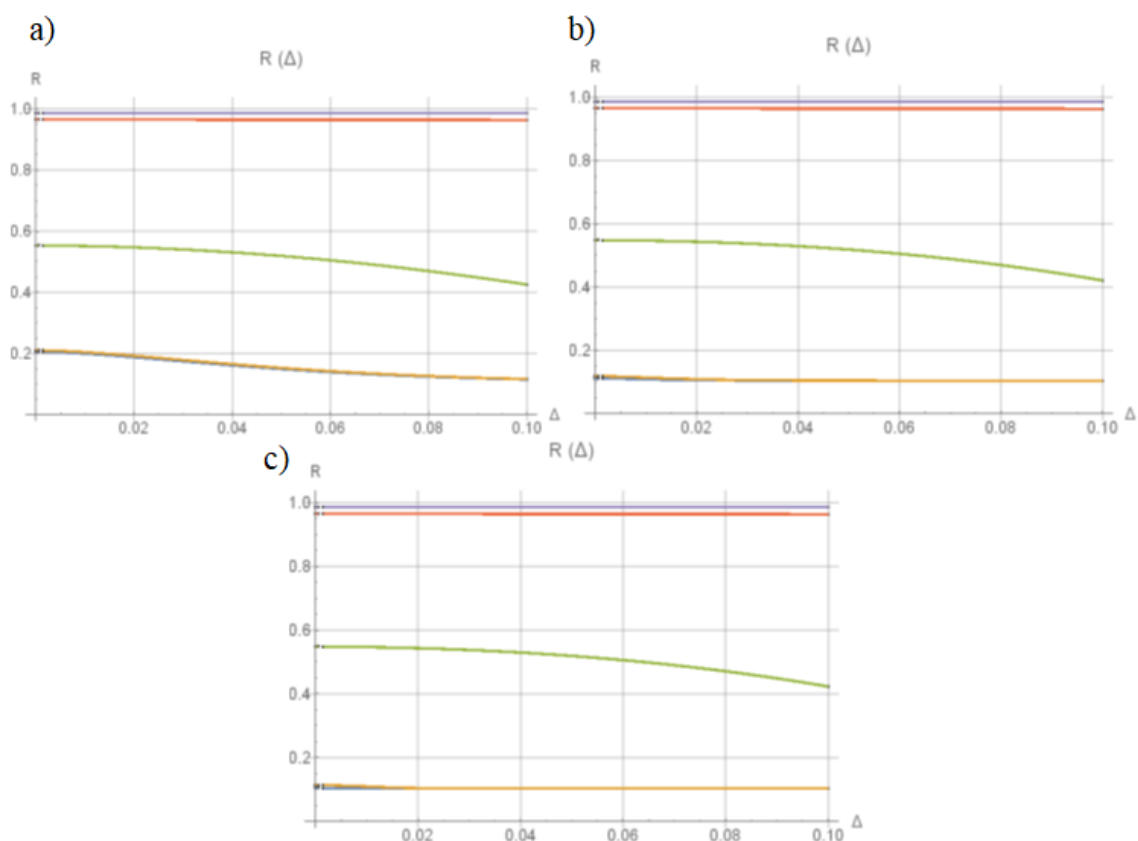


Рис. 5. Коэффициент отражения пластины SiO_2 с графеновым покрытием при нормальном падении как функции массовой щели для $\hbar\omega = 1$ мэВ при (a) $T = 300$ К, (b) $T = 77$ К, (c) $T = 4.4$ К (синяя линия - $\mu = 0$, оранжевая линия - $\mu = 0,01$, зеленая линия - $\mu = 0,1$, красная линия - $\mu = 0,5$, фиолетовая линия - $\mu = 0,8$).

Заключение

Использованная диэлектрическая пластина рассматривалась как подложка из диоксида кремния, покрытая щелевым графеном с некоторым химическим потенциалом μ . Чистый отдельно стоящий графен имеет массовую щель в спектре квазичастиц, равную $\Delta = 0$, но из-за дефектов структуры, электрон-электронного взаимодействия и при наличии подложки массовая щель возрастает на 0,1 или 0,2 эВ. Кроме того, химический потенциал не равен нулю для любого реального образца графена и принимает типичные значения $\mu \sim 0.1$ эВ.

Результаты численных расчетов показывают, что в совместном действии массовой щели, химического потенциала, частоты падающего света и температуры на

коэффициент отражения существует нетривиальное взаимодействие. Согласно нашим результатам, увеличение химического потенциала и массовой щели графенового покрытия влияет на коэффициент отражения в противоположных направлениях, делая его больше и меньше соответственно. Показано, что при достаточно низких частотах коэффициент отражения пластины с графеновым покрытием приближается к единице, но снижается до коэффициента отражения пластины без покрытия на достаточно высоких частотах. В этом отношении графеновое покрытие качественно похоже на металлическую пленку. При $\hbar\omega \geq 20$ мэВ графеновое покрытие не влияет на коэффициент отражения пластины из кварцевого стекла независимо от значений массовой щели и химического потенциала. Температура оказывает основное влияние на коэффициент отражения графеновых покрытий с относительно небольшим химическим потенциалом. При достаточно высоком химическом потенциале снижение от комнатной температуры до значения жидкого гелия не влияет на коэффициент отражения.

Полученные результаты демонстрируют очень важную особенность: в частотном диапазоне, в котором функционируют устройства оптических телекоммуникаций, покрытие подложки слоем графена не оказывает влияния на ее отражательную способность.