

алюминия при изготовлении светодиодных модулей может быть эффективно для снижения теплового сопротивления в звене кристалл – подложка. Платы из алюминия с нанопористым анодным оксидом целесообразно использовать для монтажа светодиодов мощностью более 3 Вт вместо плат из FR4 из-за их более низкого теплового сопротивления и высокой эффективности теплового рассеивания.

Список использованных источников:

1. Тучковский, А. К. Универсальный энергосберегающий светодиодный модуль на плате из анодированного алюминия / А. К. Тучковский, И. А. Врублевский, К. В. Чернякова // Технические средства защиты информации: тезисы докладов X Белорусско-российской научно-технической конференции, 5 – 6 июня 2013 г., Минск. - Минск: БГУИР, 2013. - С. 60..
2. Врублевский, И. А. Светодиодные линейки на анодированном алюминии для систем освещения / И. А. Врублевский и другие // Технические средства защиты информации : тезисы докладов XII Белорусско-российской научно-технической конференции, 28–29 мая 2014 г., Минск. – Минск : БГУИР, 2014. — С. 54.
3. Динь Х. Т. Высокоэффективные светодиодные линейки на плате из анодированного алюминия с низким коэффициентом пульсаций / Д. Х. Тай, И. А. Врублевский, Е. В. Чернякова, А. К. Тучковский, А. П. Казанцев // Технические средства защиты информации: Тезисы докладов XIV Белорусско-российской научно-технической конференции. (Минск 25-26 мая 2016 г.). - Минск: БГУИР, 2016. – С. 71.

КОМПЛЕКСНАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ МОНОСЛОЯ ГРАФЕНА В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

Фельшерук А.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Данилюк А.Л. – к.ф.-м.н., доцент

Представлены результаты моделирования поверхностной проводимости и комплексной диэлектрической проницаемости графена в терагерцевом частотном диапазоне. Полученные частотные зависимости показали, что управлять проводимостью и диэлектрической проницаемостью графена можно путем изменения значения химического потенциала.

За последнее десятилетие исследователи пришли к выводу, что на границе между проводником и диэлектриком возможно получить поверхностные плазмоны с той же частотой, что и внешние электромагнитные волны, но с намного меньшей длиной волны. Это позволит использовать плазмоны в наноструктурах для переноса информации внутри интегральной микросхемы. Плазмонные межсоединения стали бы настоящим прорывом в области повышения рабочих частот интегральных микросхем. В этом плане перспективным направлением для решения подобной задачи является исследование плазмонных колебаний в терагерцевом диапазоне частот и, в частности, с использованием графена на диэлектрической подложке. Однако на этом пути еще предстоит решить ряд не только технологических, но и физических задач по возбуждению, распространению и детектированию плазмонных колебаний с контролируемыми параметрами.

В данной работе представлены результаты моделирования поверхностной проводимости и диэлектрической проницаемости в однослойной графеновой наноструктуре в зависимости от величины химического потенциала μ и температуры в терагерцевом частотном диапазоне. В качестве модели поверхностной проводимости графена было использовано следующее выражение [1]:

$$\sigma_s(\omega) = \sigma_{intra}(\omega) + \sigma_{inter}(\omega), \quad (1)$$

$$\sigma_{intra}(\omega) = -j \frac{e^2 k T}{\pi \hbar^2 (\omega - j 2\Gamma)} \left(\frac{\mu}{kT} + 2 \ln \left(\exp \left(\frac{-\mu}{kT} \right) + 1 \right) \right), \quad (2)$$

$$\sigma_{inter}(\omega) = \frac{e^2}{4\hbar} \left[H(\omega/2) + j \frac{4\omega}{\pi} \int_0^\infty \frac{H(\Omega) - H(\omega/2)}{\omega^2 - 4\Omega^2} d\Omega \right], \quad (3)$$

где Γ – скорость рассеяния электронов, \hbar – редуцированная постоянная Планка, k – постоянная Больцмана, T – температура, c – скорость света, e – заряд электрона, ω – круговая частота, функции

$$H(\Omega) = \frac{\sinh\left(\frac{\hbar\Omega}{kT}\right)}{\cosh\left(\frac{\hbar\Omega}{kT}\right) + \cosh\left(\frac{\mu}{kT}\right)}, \quad (4)$$

В рассматриваемом диапазоне частот $\sigma_{inter}(\omega) \ll \sigma_{intra}(\omega)$, т. е. вкладом межзонных переходов в проводимость можно пренебречь [1]. Таким образом, поверхностная проводимость графена может быть описана в рамках теории Друде.

В задачах электродинамики используется эффективная диэлектрическая проницаемость графена, в уравнения Максвелла входит объемная удельная проводимость σ , которая выражается через поверхностную проводимость. Для монослоя графена в рассматриваемом диапазоне частот вводится следующая комплексная диэлектрическая проницаемость [2]:

$$\varepsilon(\omega, \mu) = 1 + \frac{j\sigma}{\varepsilon_0\omega}, \quad (5)$$

Поверхностная и объёмная проводимости связаны соотношением $\sigma = \sigma_S/d$, где d – толщина графена.

На рисунке 1 приведены частотные зависимости действительной и мнимой части поверхностной проводимости монослоя графена при различных значениях химического потенциала. Величина действительной части поверхностной проводимости графена пропорциональна $1/\omega^2$, а величина мнимой части пропорциональна $-1/\omega$ в рассматриваемом частотном диапазоне.

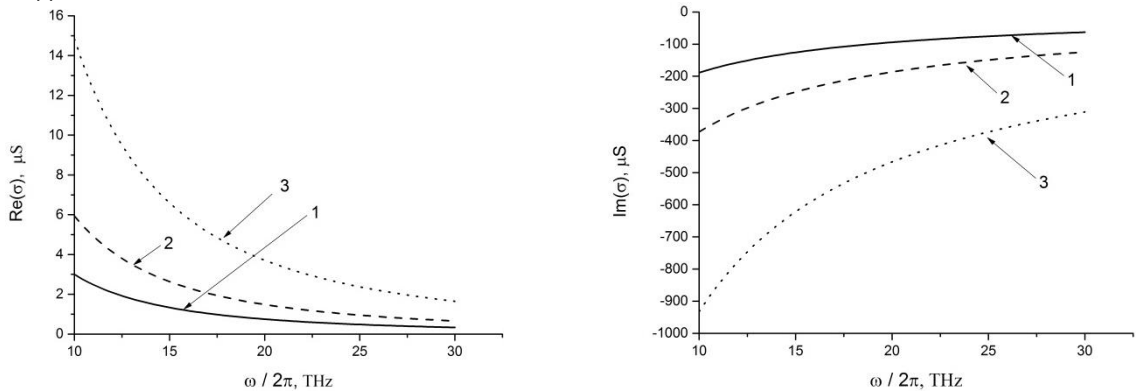


Рисунок 1 – Частотные зависимости действительной и мнимой части поверхностной проводимости монослоя графена при различных химических потенциалах μ (1 — $\mu = 0,1$ эВ; 2 — $\mu = 0,2$ эВ; 3 — $\mu = 0,5$ эВ)

На рисунке 2 приведены частотные зависимости действительной и мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости монослоя графена при различных значениях химического потенциала.

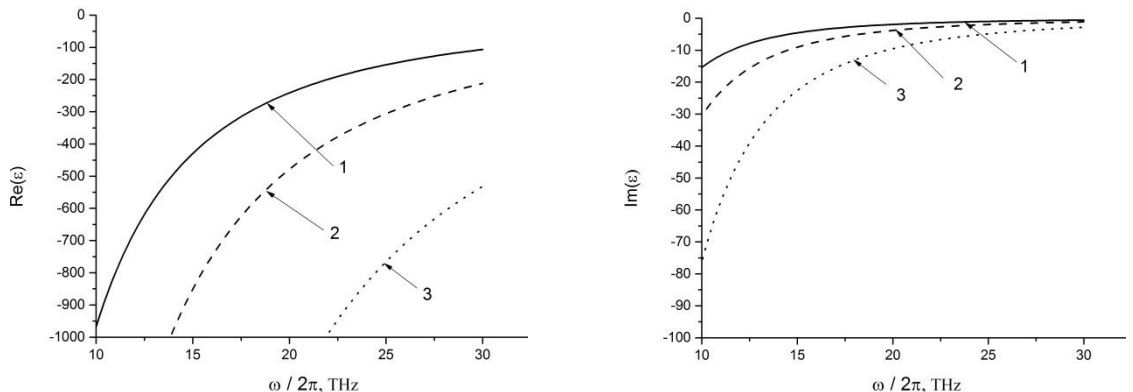


Рисунок 2 – Частотные зависимости действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости монослоя графена при различных значениях химического потенциала μ (1 — $\mu = 0,1$ эВ; 2 — $\mu = 0,2$ эВ; 3 — $\mu = 0,5$ эВ)

Из графиков на рисунке 2 следует, что при различных значениях химического потенциала действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости монослоя графена пропорциональна $-1/\omega^2$, а мнимая часть диэлектрической проницаемости пропорциональна $-1/\omega^3$ в рассматриваемом частотном диапазоне.

Таким образом, проведено моделирование параметров однослойной графеновой наноструктуры в зависимости от химического потенциала и температуры. Полученные частотные зависимости показали, что управлять проводимостью и диэлектрической проницаемостью графена можно путем изменения значения химического потенциала, величина которого может регулироваться, например, потенциалом полевого электрода, внедрением примесей, созданием дефектов, или изменением числа слоев графена.

Список использованных источников:

1. Andryieuski, A. Graphene metamaterials based tunable terahertz absorber: effective surface conductivity approach / A. Andryieuski, A. V. Lavrinenko // Optics express. – 2013. – Т. 21. – №. 7. – С. 9144-9155.
2. Голованов, О. А. Проводимость графена в терагерцовом и инфракрасном диапазонах частот / О. А. Голованов, Г. С. Макеева, В. В. Вареница // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 4 (8). – С. 26–33

ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СТРУКТУРЕ КРЕМНИЙ/НАНОЧАСТИЦА ОКСИДА ЦИНКА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ СОЛНЕЧНЫМ СВЕТОМ

Куралцова А.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Данилюк А.Л. – канд. физ.-мат. наук, доцент

В данной работе приводятся результаты моделирования влияния солнечного света на электронно-дырочные процессы проходящие в гетероструктуре кремний/оксид цинка. Моделирование проводилось с помощью пакета Comsol Multiphysics. Исследовалось влияние длины волны солнечного излучения на электронно-дырочные процессы гетероструктуры p-Si/n-ZnO.

В настоящее время возрастает интерес к широкозонным полупроводниковым оксидам металлов, например, к оксиду цинка. Оксид цинка применяется в газоанализаторах, оптоэлектронике и фотовольтаике, используется в солнечных элементах, фотокаталитических процессах разложения воды, очистки воды и воздуха от загрязнений [1]. В это же время гетероструктуры хорошо показали себя для пространственного разделения носителей заряда. Целью данной работы является исследование электрических свойств гетероструктуры кремний/оксид цинка (p-Si/n-ZnO) в условиях солнечного излучения.

В данной работе было проведено исследование электронно-дырочных процессов в гетероструктуре кремний / оксид цинка (кремний с наночастицей оксида цинка). Высота области кремния 1 мкм, длина 2,5 мкм, частица оксида цинка 0,5 × 0,5 мкм расположена посередине у верхней границы области кремния, глубина структуры 1 мкм (рисунок 1).

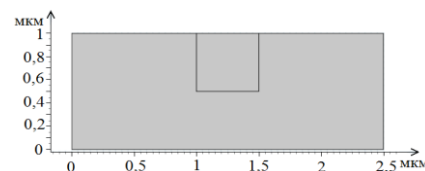


Рисунок 1 – Геометрия структуры

Моделирование электронно-дырочных процессов проводилось с помощью пакета Comsol, в котором используется двумерная диффузионно-дрейфовая модель для моделирования токопереноса в полупроводниках и модель электромагнитных волн, основанная на уравнениях Максвелла.

Параметры материалов для кремния и оксида цинка соответственно: степень легирования $N_a=10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $N_d=10^{16} \text{ см}^{-3}$; относительная диэлектрическая постоянная 11,7 и 8,5; подвижность электронов $1450 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и $200 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$; подвижность дырок $500 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и $50 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$; ширина запрещенной зоны 1,12 эВ и 3,4 эВ; сродство к электрону 4,05 эВ и 4,3 эВ; время жизни электронов и дырок 500 пс в кремнии и 0,97 нс в оксиде цинка. Температура 300 К. Действительная часть коэффициента преломления для оксида цинка $n_{\text{ZnO}}=2$. Действительная часть коэффициента преломления для кремния n_{Si} , а также мнимая часть коэффициента преломления k_{ZnO} и k_{Si} заданы таблично в зависимости от длины волны [2, 3].

При облучении солнечным излучением мощностью $2,5 \cdot 10^{-9} \text{ Вт}$ (плотность излучения $1 \text{ кВт}/\text{м}^2$) были смоделированы концентрации электронов на поверхности структуры для различных длин волн (рисунок 2).