

УДК 537.87

DOI: 10.17223/00213411/63/1/45

П.О. КАЗИНСКИЙ, Г.Ю. ЛАЗАРЕНКО

МОЩНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНА В ГРАФЕНЕ *

Рассмотрена динамика и излучение заряженной частицы, движущейся в постоянном электромагнитном поле и обладающей линейным законом дисперсии: $\epsilon(\mathbf{p}) = v_F |\mathbf{p}|$. Такой закон дисперсии характерен для электрона в графене и сходных ему наноструктурах. Найдено общее решение уравнений движения частицы. Получены явные выражения для излученной энергии. Показано, что при $|H_z| \leq v_F |E_x|$ излученная электроном энергия за бесконечное время конечна.

Ключевые слова: графен, линейный закон дисперсии, излученная энергия, баллистическое приближение, формула Лармора.

Введение

Графен является первым из открытых двумерных кристаллов [1]. Он обладает большой механической жесткостью [2], теплопроводностью [3] и мобильностью носителей заряда [4]. Также графен является ключом к пониманию свойств наноструктур, образующихся из него, например, таких, как нанотрубки, двухслойный графен и графит [4]. Электроны в графене обладают постоянной по модулю скоростью и нулевой эффективной массой [4, 5]. Линейный закон дисперсии справедлив для энергий электрона, не превышающих $p_{\max}^0 = 0.1$ эВ. На сегодняшний день получены аналогичные графену по структуре двумерные кристаллы: германен, борофен, фосфорен и силицен. Они не образованы на основе углерода и состоят из атомов германия, бора, фосфора и кремния соответственно. Методы получения графена, на сегодняшний день, становятся все эффективней и имеют перспективы выхода в промышленность с целью коммерческого использования [6, 7]. Одним из применений графена в промышленности является создание на его основе ТГц-транзисторов [8].

Излучение электронов в графене в сильных полях исследовалось в работах [9, 10]. Также изучено излучение электронов в гофрированном графене [11, 12] и в графеновых нанотрубках [13]. Было показано, что графен может служить источником ТГц-излучения [14]. В данной работе мы найдем точное решение уравнений движения электрона в графене в баллистическом режиме, т.е. на временах, много меньших времени свободного пробега, и вычислим полную мощность создаваемого им излучения. Для массивной частицы в электрическом и скрещенном полях излученная энергия за бесконечное время движения бесконечна. Однако для электрона в графене это не так. В постоянном электрическом и скрещенном полях частица излучает конечную энергию за бесконечное время.

1. Модель частицы с линейным законом дисперсии

Динамику электрона в графене в квазиклассическом приближении можно описать, используя модель заряженной частицы с зарядом e , которая имеет линейный закон дисперсии и стандартным образом взаимодействует с электромагнитным полем (см., например, [15]). Данная модель задается функционалом действия [16]

$$S[x, p, A, \lambda] = \int d\tau \left[(p_\mu + eA_\mu) \dot{x}^\mu - \frac{\lambda}{2} p_\mu p_\nu \tilde{\eta}^{\mu\nu} \right] - \frac{1}{16\pi} \int d^4x F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}, \quad (1)$$

где $F_{\mu\nu} := \partial_{[\mu} A_{\nu]}$ – тензор напряженности электромагнитного поля, $\eta^{\mu\nu} := \text{diag}(1, -1, -1, -1)$ – метрика Минковского, $\lambda(\tau)$ – множитель Лагранжа, $\tilde{\eta}^{\mu\nu} := \text{diag}(v_F^{-2}, -1, -1, -1)$, $v_F \approx 10^8$ см/с –

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 3.9594.2017 / 8.9.

Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала
«Известия высших учебных заведений. Физика»
осуществляется на платформе
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU
на платной основе:

<https://www.elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>