

УДК 539.120.61:535.326:539.184.2

ЭФФЕКТ ИЗМЕНЕНИЯ МАССЫ ЭЛЕКТРОНА И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ОДНОМЕРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ

Р. Х. Гайнутдинов^{1,2}, А. И. Гарифуллин¹, М. А. Хамадеев^{1,2}

В данной работе исследуется процесс взаимодействия атомов, помещенных в полости одномерного фотонного кристалла (ФК), с собственным полем излучения. Методом матриц перехода рассчитаны дисперсионные соотношения, плотность фотонных состояний для одномерного ФК, состоящего, в первом случае, из слоев арсенида галлия и вакуума и, во втором случае, из слоев метаматериала и вакуума. Показано как меняется собственно энергетическая поправка к энергии состояния $1s$ атома водорода от оптической контрастности и относительной толщины слоев одномерного ФК.

Ключевые слова: фотонные кристаллы, метаматериалы, атом водорода, масса электрона, собственно энергетическая поправка.

Введение. В последние десятилетия существенный интерес исследователей привлекают новые структурированные среды, такие как фотонные кристаллы (ФК) [1]. ФК имеют периодическую диэлектрическую структуру с фотонными запрещенными зонами (ФЗЗ) [2]. Данные среды являются перспективным материалом для создания элементов фотоники и для наблюдения и исследования квантово-электродинамических (КЭД) эффектов [3].

В работе [4] было показано, что сильная модификация электромагнитного взаимодействия в среде ФК приводит к изменению массы помещенных в них электронов. Данный КЭД эффект отсутствует в вакууме. Взаимодействие электрона с собственным полем излучения приводит к поправке его физической массы m_{ph} , известной как электромагнитная масса электрона m_{em} . Электромагнитную массу невозможно посчитать

¹ Казанский федеральный университет, Институт физики, кафедра оптики и нанофотоники, 420008 Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18; e-mail: Renat.Gainutdinov@kpfu.ru.

² Академия наук Республики Татарстан, 420111 Россия, г. Казань, ул. Баумана, 20.

или экспериментально измерить в связи с неперенормируемой ультрафиолетовой расходимостью. Наблюдаемой является только физическая масса m_{ph} электрона, и электромагнитная масса m_{em} уже включена в нее. Модификация электромагнитного взаимодействия в среде ФК приводит к изменению электромагнитной массы m_{em} . Данная поправка δm_{pc} , появляющаяся при перемещении электрона из свободного пространства в среду ФК, равна соответствующей поправке к электромагнитной массе электрона. Поправка δm_{pc} является конечной величиной и может быть рассчитана. Отличительной особенностью собственно энергетического вклада δm_{pc} является его зависимость от направления импульса электрона в ФК, и данная зависимость приводит к изменению частот переходов в атомах, помещенных в полости ФК, сопоставимых по величине с обычными атомными переходами.

Целью работы является исследование поправок к кинетической энергии атомов, помещенных в полости одномерного ФК. Мы показываем, как изменяется собственно энергетическая поправка к энергии состояния $1s$ атома водорода в зависимости от оптической контрастности и относительной толщины слоев одномерного ФК. В качестве слоя с высоким показателем преломления взят GaAs ($n_{\text{eff}} = 3.5$) [5] и метаматериал с ультравысоким показателем преломления ($n_{\text{eff}} = 6$), состоящий из золотых наночастиц с диэлектрической матрицей на основе HfO_2 , из работ [6, 7]. Расчет дисперсионных соотношений проводился численно по методу матриц перехода [2], теоретическая модель плотности фотонных состояний была взята из работы [8].

Обсуждение результатов и выводы. В связи с модификацией взаимодействия заряженной частицы с собственным полем излучения вклад в энергию электрона в ФК будет отличаться от вклада в случае вакуума. Наблюдаемой поправке (1) соответствует оператор, зависящий от импульса электрона \vec{p} :

$$\widehat{\delta E} = \frac{\alpha}{2m_e^2\pi^2} \left[\sum_n \int_{\text{FBZ}} \frac{d^3\vec{k}}{\omega_{kn}^2} \sum_{\vec{G},\lambda} |e_{kn}^{\vec{G}\lambda}|^2 |\vec{p} \cdot \vec{\epsilon}_{\vec{G}\lambda}|^2 - \int \frac{d^3\vec{k}}{2k^2} \sum_{\lambda=1}^2 |\vec{p} \cdot \vec{\epsilon}_\lambda(\vec{k})|^2 \right], \quad (1)$$

где α – постоянная тонкой структуры, $\omega_{kn}(\vec{k})$ – дисперсионные соотношения фотона в среде ФК, $\vec{\epsilon}_{\vec{G}\lambda}$ – единичный вектор поперечной поляризации (λ) блоховского фотона, $e_{kn}^{\vec{G}\lambda}$ – амплитуда его волновой функции. Интегрирование собственно энергетического вклада в среде ФК осуществляется по первой зоне Бриллюэна (FBZ), суммирование в ряд по плоским волнам выполняется по семейству векторов обратной решетки ФК $\vec{G} = N_1\vec{b}_1 + N_2\vec{b}_2 + N_3\vec{b}_3$, где \vec{b}_i – элементарный вектор обратной решетки [2]. Рассматривая случай атомного электрона, нужно находить матричный элемент собственно энер-

гетической поправки с соответствующей волновой функцией состояния частицы. Как было показано в работе [4], связь матричного элемента с плотностью состояний системы выражается формулой:

$$\langle \widehat{\delta E} \rangle_{1s} = \frac{\alpha^2}{2} \frac{4\alpha}{3\pi} \int_0^\Lambda d\omega \frac{N_{DOS}^{1D}(\omega) - \omega^2}{\omega^2}, \quad (2)$$

где Λ – параметр обрезания, зависящий от дисперсионных свойств среды, он вводится в связи с тем, что при больших энергиях фотоны не замечают периодическую среду кристалла и ведут себя как в вакууме; $N_{DOS}^{1D}(\omega)$ – плотность фотонных состояний для одномерного ФК. Плотность состояний – важная величина, характеризующая количество допустимых мод поля в некотором частотном диапазоне в среде ФК. Расчет плотности состояний для одномерного ФК проводился по следующей формуле [8]:

$$N_{DOS}^{1D}(\omega) = [V/(2\pi)^2] 2 \sum_n \int_0^{\sqrt{\epsilon_i}\omega/c} \beta d\beta / (\partial\omega/\partial k_B|_\beta^p), \quad (3)$$

где $\beta = \sqrt{k_y^2 + k_z^2}$ – тангенциальное волновое число, $\vec{k} = (k_B, \beta \cos \varphi, \beta \sin \varphi)$ – волновой вектор фотона. В качестве оптически более плотного слоя одномерного ФК был взят GaAs ($n_{\text{eff}} = 3.5$) [5] и метаматериал с ультравысоким показателем преломления ($n_{\text{eff}} = 6$), состоящий из золотых наночастиц с диэлектрической матрицей на основе HfO₂ [6, 7]. В работе мы не учитывали поглощение арсенида галлия и метаматериала. На рис. 1((а), (б)) в плотности состояний наблюдаются острые пики, свидетельствующие о сильной модификации электромагнитного поля в периодической среде ФК по сравнению с вакуумом и о стремлении групповой скорости фотонов к нулю на краях ФЗЗ. Согласно модели (2) при увеличении оптического контраста ФК растет величина фотонной плотности состояний и поправка к кинетической энергии электрона. Вклад в кинетическую энергию атомного электрона квадратично зависит от оптического контраста, что можно проследить по поведению кривой на рис. 2(а). Аналогичный рост $\langle \delta E_{pc} \rangle$ наблюдается при увеличении доли заполнения ФК оптически более плотным веществом (рис. 2(б)).

Как показано в работе [4], существенной особенностью энергетического сдвига $\langle \delta E_{pc} \rangle$ является его зависимость лишь от орбитального l и магнитного m_l квантовых чисел состояния электрона, что открывает путь для управления энергетическими уровнями атомов и физико-химическими процессами в среде ФК.

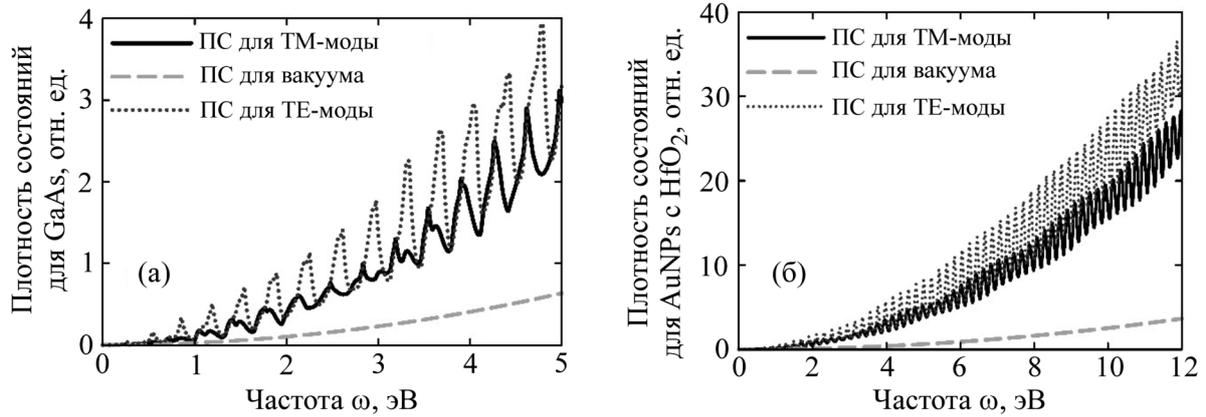


Рис. 1: Плотность состояний (ПС) для одномерного ФК с оптически плотным слоем из (а) арсенида галлия с показателем преломления n_h (h – “high”) = 3.5 и (б) метаматериала на основе золотых наночастиц, покрытых пленкой из HfO₂, с $n_h = 6$ и с относительной толщиной слоев $d_h/T = 2/3$ в обоих случаях. В качестве другой среды был выбран слой с n_l (l – “low”) = 1 и с относительной толщиной $d_l/T = 1/3$. Прерывистая линия соответствует плотности мод неполяризованного света в вакууме.

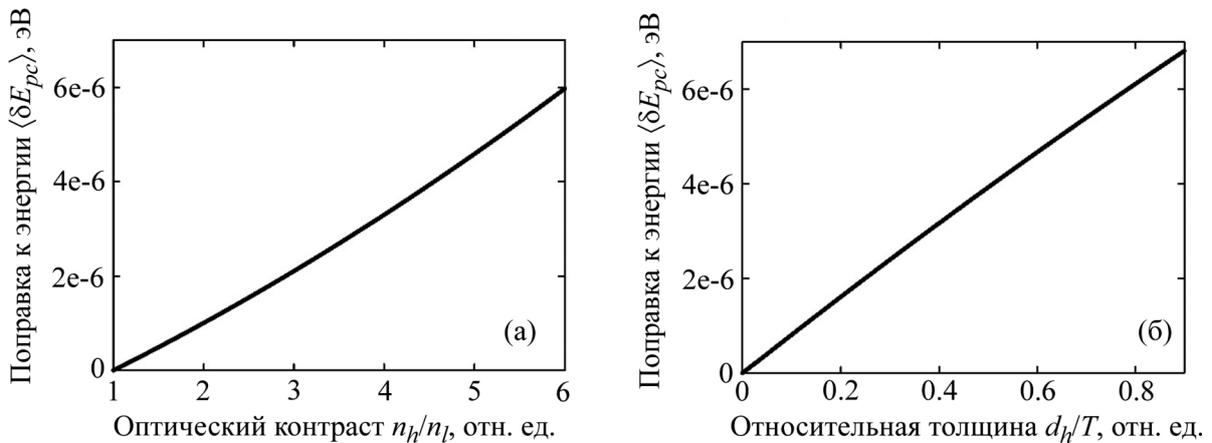


Рис. 2: Зависимость поправки к кинетической энергии состояния $1s$ атома водорода (а) от оптического контраста, (б) от относительной толщины слоев ФК. Параметры ФК: (а) $n_l = 1$ и $d_l/T = 1/3$, $\max(n_h) = 6$ и $d_h/T = 2/3$; (б) $n_l = 1$ и $\max(d_l/T) = 0.1$, $n_h = 6$ и $\max(d_h/T) = 9/10$. Период структуры ФК $T = 750$ нм. Параметр обрезания $\Lambda = 12$ эВ.

Заключение. Мы показали влияние среды фотонного кристалла на характер взаимодействия атомных электронов с собственным полем излучения. Проведен расчет

поправки к кинетической энергии состояния $1s$ атома водорода в среде одномерного фотонного кристалла, состоящего, в первом случае, из чередующихся слоев GaAs и вакуума, и из слоев метаматериала с ультравысоким показателем преломления на основе золотых наночастиц с диэлектрической матрицей HfO_2 и вакуума во втором. Проанализирована зависимость собственно энергетического вклада от характеристик фотонного кристалла: поправка квадратично зависит от оптического контраста и относительной толщины слоев фотонно-кристаллической структуры. При определенных параметрах кристалла вклад в энергию атомного электрона может превышать величину лэмбовского сдвига. Исследуемый эффект может быть использован для точной подстройки энергетических уровней атомов, управления физико-химическими процессами и создания линейчатых источников нового типа на основе ФК.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn, and R. D. Meade, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light* (Princeton University Press, Princeton, 2008).
- [2] K. Sakoda, *Optical Properties of Photonic Crystals* (Springer, Berlin, 2004).
- [3] R. Gainutdinov, M. Khamadeev, A. Akhmadeev, and M. Salakhov, *Theoretical Foundations and Application of Photonic Crystals* (InTech, London, 2018).
- [4] R. Kh. Gainutdinov, M. A. Khamadeev, and M. Kh. Salakhov, *Phys. Rev. A* **85**(5), 053836 (2012).
- [5] D. E. Aspnes, S. M. Kelso, R. A. Logan, and R. Bhat, *J. Appl. Phys.* **60**(2), 754 (1986).
- [6] D. Franta, D. Nečas, and I. Ohlídal, *Appl. Opt.* **54**(31), 9108 (2015).
- [7] K. Chung, R. Kim, T. Chang, and J. Shin, *Appl. Phys. Lett.* **109**(2), 021114 (2016).
- [8] C. R. Ooi, T. A. Yeung, T. K. Lim, and C. H. Kam, *Phys. Rev. E* **62**(5), 7405 (2000).

Поступила в редакцию 5 января 2019 г.

После доработки 27 марта 2019 г.

Принята к публикации 27 марта 2019 г.

Публикуется по результатам XVI Всероссийского молодежного Самарского конкурса-конференции по оптике и лазерной физике (Самара).