

Особенности усиления электромагнитного поля и увеличение плотности фотонных состояний в растительных фотонно-кристаллических структурах

А.В. Шабанов¹, М.А. Коршунов¹, Е.Р. Буханов²

¹ Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН,
660036, Россия, г. Красноярск, ул. Академгородок, д. 50/12,

² ФИЦ КНЦ СО РАН, 660036, Россия, г. Красноярск, ул. Академгородок, д. 50

Аннотация

Проведены расчёты с использованием метода трансфер матриц одномерных фотонных кристаллов с низким контрастом и разнопериодными асимметричными структурами. Такие структуры были найдены во многих растениях. При состыковке двух последовательно соединённых подрешёток с разными периодами отмечается увеличение амплитуды электромагнитного поля и плотности фотонных состояний внутри структуры и их изменение в зависимости от асимметрии толщин подрешёток.

Ключевые слова: фотонный кристалл, дефектная мода, фотонная запрещённая зона, слоистые периодические структуры, плотность фотонных состояний.

Цитирование: Шабанов, А.В. Особенности усиления электромагнитного поля и увеличение плотности фотонных состояний в растительных фотонно-кристаллических структурах / А.В. Шабанов, М.А. Коршунов, Е.Р. Буханов // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 2. – С. 231-237. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-2-231-237.

Введение

Процессы, происходящие в листьях растений под действием света, играют исключительную роль в обеспечении условий жизни на Земле. Они являются первичными процессами фотосинтеза, обеспечивающего прирост биомассы и кислорода. Изучение этого процесса находится под пристальным вниманием исследователей. Современные достижения и проблемы в изучении первичного процесса фотосинтеза представлены в обзорах [1, 2]. Затруднение в количественном описании процесса вызвано сложной структурой зелёного листа, легко изменяющего структурные параметры даже под слабым внешним воздействием. В [1] описаны пять моделей свето-собирающих комплексов в листьях и четыре модели передачи светового возбуждения. В [2] проведено рассмотрение первичного этапа фотосинтеза с учётом обнаруженного в последние годы [3] фотонно-кристаллического строения растений. Удалось объяснить основные специфические особенности распространения света в зелёном листе. Тем не менее остаётся непонятной роль изменения окраски листьев в зависимости от условий освещения. Согласно общепринятым представлениям наличие в хлоропластах листьев зелёных пигментов (хлорофиллов) объясняет цвет растений.

Между тем у ряда растений [4–11] невооружённым глазом видна радужная окраска (иридесценция), переливающаяся при изменении угла наблюдения, что является прямым подтверждением наличия структурной окраски из-за слоистой среды (это одно из свойств фотонных кристаллов).

В работе [3] проведено исследование слоистых структур в верхних эпидермальных клетках бегонии в условиях резкой заморозки. Это позволило сохранить исходное состояние и получить снимки высокого разрешения на электронном микроскопе (рис. 1). В

толще листа расположены хлоропласты, имеющие квазипериодическую структуру. На рис. 2 из работы [3] показана структура иридопласта и её параметры. В работе [3] эти структуры впервые были отождествлены с фотонным кристаллом с периодически изменяющимися показателями преломления.

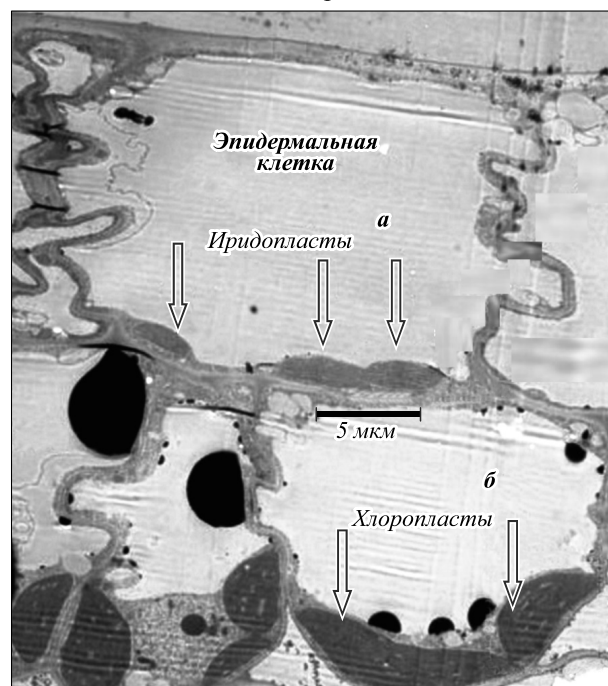


Рис. 1. Электронная микрофотография листа бегонии, содержащая иридопласты (а) и хлоропласты (б) [3]

В работах [4, 9] обсуждалось влияние синей окраски листа растений на эффективность фотосинтеза. При этом были учтены интерференционные эффекты от верхних слоёв, но распространение света в толще листа рассматривалось в модели Аллена [12], в которой предполагается изотропное диффузное рассеяние.

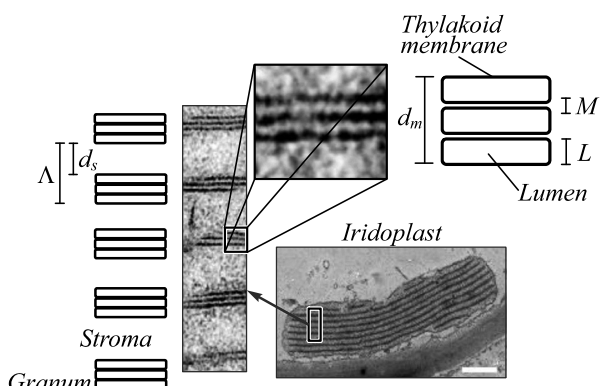


Рис. 2. Структура иридопластов: $d_s = 125$ нм, $M = 9$ нм, $L = 7,5$ нм [3]

В работе [4] было выявлено уменьшение отражения в красной области спектра, что, по мнению авторов, способствовало увеличению поглощения и по этой причине возрастанию эффективности фотосинтеза. В работе [9] исследовалось отражение света в широком диапазоне и идея авторов [4] не подтвердилась.

Эффективность фотосинтеза более корректно сравнивать с плотностью фотонных состояний, чем с параметрами отдельных спектральных линий отражения.

Согласно золотому правилу Ферми, скорость химических реакций, происходящих под действием света, пропорциональна плотности фотонных состояний. Кроме этого, следует иметь в виду, что вероятность фотохимической реакции зависит от локальной амплитуды электрического поля. Связь между фотосинтезом и электрическим полем предложена Witt [13, 14].

Известно [15], что амплитуда электромагнитного поля усиливается на краях запрещённой зоны и на дефектах.

Цель работы – рассмотреть особенности поведения электромагнитного поля и плотности фотонных состояний в листьях, имеющих асимметричную фотонно-кристаллическую (ФК) структуру.

Расчёт

Количество публикаций, посвящённых изучению фотонных кристаллов с высоким диэлектрическим контрастом и дефектами, непрерывно растёт с выявлением новых интересных свойств [15–21]. Классификация дефектов и их влияние на спектры традиционных ФК-структур с широкой запрещённой зоной, представлены в работе [15].

В настоящей работе проведены вычисления плотности фотонных состояний асимметричных структур с низким контрастом (как в растительных структурах).

В данной статье рассматривалось нормальное падение света в немагнитной среде ($\mu = 1$), состоящей из слоев толщиной L_N с показателем преломления n_N , вдоль оси Oz распространяется плоская электромагнитная волна. Амплитуды волн (A и B), идущих в прямом и обратном направлении вдоль оптической оси, в предыдущем слое зависят от этих же значений в текущем [22]:

$$\begin{aligned}
 A_{N-1} &= \frac{1}{2} \times \\
 &\times \left(\left(1 + \frac{n_N}{n_{N-1}} \right) A_N e^{-i \frac{\omega}{c} n_N L_N} + \left(1 - \frac{n_N}{n_{N-1}} \right) B_N e^{i \frac{\omega}{c} n_N L_N} \right), \\
 B_{N-1} &= \frac{1}{2} \times \\
 &\times \left(\left(1 - \frac{n_N}{n_{N-1}} \right) A_N e^{-i \frac{\omega}{c} n_N L_N} + \left(1 + \frac{n_N}{n_{N-1}} \right) B_N e^{i \frac{\omega}{c} n_N L_N} \right), \\
 E(z, N) &= A_N e^{-i \frac{\omega}{c} n_N z} + B_N e^{i \frac{\omega}{c} n_N z}, \\
 H(z, N) &= i \frac{\omega}{c} n_N \left(A_N e^{-i \frac{\omega}{c} n_N z} - B_N e^{i \frac{\omega}{c} n_N z} \right),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где N – номер слоя, E и H – распределение электрического и магнитного полей в слое, $\omega = 2\pi\nu\chi$, χ – масштабирующий коэффициент, χL_N – линейный размер слоя, ν – частота, c – скорость света в вакууме.

Зная, что на выходе из структуры существует только исходящая волна ($A_{out} = 1$; $B_{out} = 0$), проведя численные расчёты, можно получить массив относительных значений амплитуд в каждом из слоёв ФК. Это позволяет найти распределение электромагнитного поля в слоистой структуре и спектр её пропускания. Коэффициент пропускания k_T [23, 24] (обязательное условие: показатели преломления сред до и после образца – одинаковы):

$$k_T = |A_0|^2. \tag{2}$$

Теоретическое описание особенностей плотности фотонных состояний кристаллов и её связь с электромагнитной энергией подробно рассмотрены в работах [25–28].

В [28] для определения плотности собственных мод предложена формула:

$$\rho_\omega = \frac{\frac{1}{2L_\Sigma} \int_0^{L_\Sigma} \left[\varepsilon_\omega(z) |E_\omega|^2 + \frac{c^2}{\omega^2} \left| \frac{dE_\omega}{dz} \right|^2 \right] dz}{c |E_\omega^I|^2}, \tag{3}$$

где E_ω – амплитуда электрической составляющей электромагнитного поля, E_ω^I – амплитуда падающей волны, $\varepsilon_\omega(z)$ – диэлектрическая проницаемость от координаты, L_Σ – общая толщина структуры.

Результаты расчёта и обсуждение

Одномерная модель биологической структуры «иридопласт–цитоплазма–хлоропласт» представлена на рис. 3.

Спектры пропускания и плотность фотонных состояний структур представлены на (рис. 4), где (а) – решётка, подобная хлоропласту, (б) – решётка, подобная иридопласту, (в) – комбинация этих решёток в составе асимметричной структуры (освещение со стороны иридопласта). Плотности фотонных состояний для этих структур повышаются на краях запрещённой зоны.

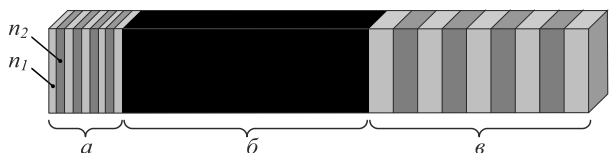


Рис. 3. Разнопериодная структура. Слева направо нечётные слои на участках (а, в) с показателем преломления $n_1 = 1,5$, на чётных $n_2 = 1,3$; (б) – промежуток между структурами иридопласта и хлоропласта со средним $n = 1,3$

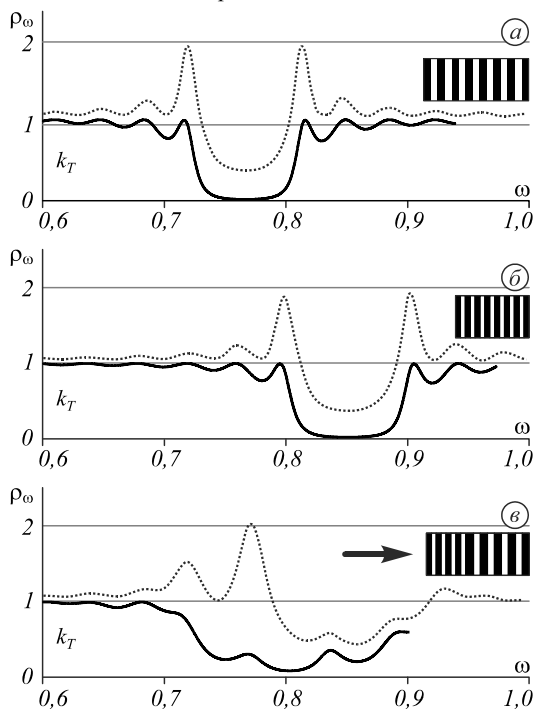


Рис. 4. Спектр пропускания и график плотности фотонных состояний для среды, состоящей из чередующихся слоёв ($n_1 = 1,5$, $n_2 = 1,3$, общее число слоёв 39). Сплошная линия – коэффициент пропускания, точечная линия – плотность фотонных состояний при освещении слева: а – структура схожая с чистым хлоропластом ($L_1 = 1$, $L_2 = 2$); б – структура, схожая с чистым иридопластом ($L_1 = 0,9$, $L_2 = 1,8$); в – структура, схожая с объединением хлоропласт-иридопласт ($L_1 = 0,9$, $L_2 = 1,8$, $L_3 = 1$, $L_4 = 2$); на графиках ω – безразмерная величина, равная $2\pi\omega/c$

В отличие от спектров отдельных подрешёток, общий спектр системы «иридопласт–хлоропласт», когда общие подрешётки соприкасаются друг с другом, имеет асимметричный вид (рис. 4в). Из-за соприкосновений двух разнопериодичных подрешёток появляется мода, плотность фотонных состояний на которой может быть выше, чем на краях запрещённой зоны однородных подрешёток.

Иридопласты и хлоропласты отличаются толщинами слоёв, способными меняться под воздействием света [29], поэтому важно рассмотреть влияние этих параметров на изменение величин плотности фотонных состояний и амплитуды электромагнитного поля в структуре.

На рис. 5 представлен график зависимости плотности фотонных состояний от соотношения толщин

слоёв (α) в иридопласте асимметричной структуры при частотном диапазоне $\omega = 0,6 \dots 1$. Как видно, наибольшая плотность фотонных состояний находится в области $\omega = 0,75$ для асимметричной структуры при отношении толщин слоёв иридопласта к хлоропласту $\alpha = 0,96$.

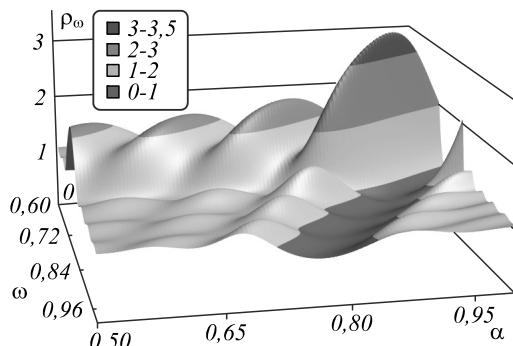


Рис. 5. График зависимости плотности фотонных состояний в иридопласте (ρ_ω) от соотношения толщин слоёв между решётками в асимметричной структуре (α) и частоты (ω)

Но, если между структурами «иридопласт–хлоропласт» встречается дефект, например водная прослойка, в запрещённой зоне, характерной для хлоропласта (у нас $\omega = 0,72 \dots 0,81$), в иридопласте может происходить усиление как амплитуды электромагнитного поля, так и плотности фотонных состояний. На рис. 6а представлены графики спектра, общей плотности фотонных состояний и плотности фотонных состояний на дефекте для фотонного кристалла с характеристиками: $n_1 = 1,5$, $n_2 = 1,3$, $n_3 = 1,5$, $n_4 = 1,3$, $n_d = 1,3$, $L_1 = 0,9$, $L_2 = 1,8$, $L_3 = 1$, $L_4 = 2$, $L_d = 24$. На рис. 6б график модуля амплитуды электрической составляющей электромагнитного поля вдоль фотонного кристалла по слоям. Средняя (затемнённая) область – это дефектный слой.

Используя экспериментальные данные из работы [3], рассчитаны плотности фотонных состояний в дефектном слое. Для этого параметры в модели фотонного кристалла брались следующими: 15 слоёв иридопласта ($n_1 = 1,5$, $n_2 = 1,3$, $L_1 = 0,96$, $L_2 = 1,92$); «дефектный» слой в виде воды между структурами ($n_d = 1,3$, $L_d = 60$); 25 слоёв хлоропласта ($n_3 = 1,5$, $n_4 = 1,3$, $L_3 = 1$, $L_4 = 2$).

Поскольку биологические объекты не могут быть идеальными и одинаковыми, были проведены расчёты с привнесёнными случайными отклонениями толщин слоёв в диапазоне до 15%. Один из крайних случаев ($\alpha = 1$, при этом средние толщины слоёв иридопласта и хлоропласта одинаковы) приведён на рис. 8.

При сравнении рис. 7 и 8 видно, что из-за искажений структуры произошло резкое уменьшение плотности фотонных состояний в дефекте более чем в 5 раз. Аналогично ведёт себя амплитуда электромагнитного поля.

Используя подход, аналогичный [22], были промоделированы искажения в геометрических параметрах слоёв подрешёток. Среднеинтегральная разница

плотностей фотонных состояний между неоднородной структурой и структурой, схожей с чистым хлоропластом в частотном диапазоне от $\omega=0,5 \dots 1,2$, приведена на рис. 9. Как видно, даже 15% отклонения оставляет усиление в области селективного отражения длиннопериодической решётки.

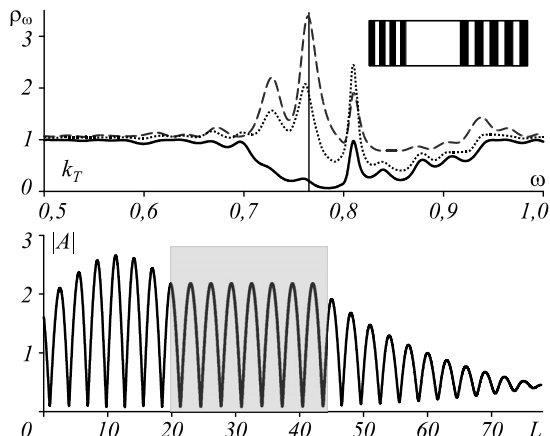


Рис. 6. а) спектр пропускания слоистой структуры (сплошная линия), общая плотность фотонных состояний (точечная линия) и плотность фотонных состояний в иридопласте (пунктирная линия). б) амплитуда электрической составляющей электромагнитного поля в фотонном кристалле при $\omega = 0,765$. Серая область соответствует дефектному слою

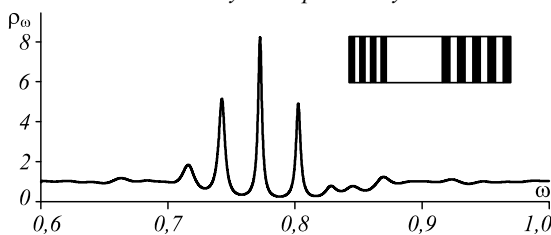


Рис. 7. График плотности фотонных состояний в дефектном слое в асимметричной структуре, разделённой дефектом

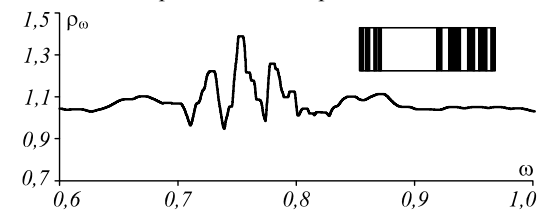


Рис. 8. График плотности фотонных состояний разупорядоченного на 15% хлоропласта с дефектом

Интересен факт, что для получения максимальной плотности фотонных состояний в иридопласте параметр отношения толщин подрешёток различен: в искажённой структуре $\alpha = 0,89$; без случайных отклонений $\alpha = 0,96$.

Изменение линейных размеров слоёв ФК в 0,89 раза способно привести к смещению зоны селективного отражения из «зелёного» цветового интервала (510–570 нм) в «синеголубой» (480–510 нм). Это соответствует изменению окраса некоторых растений в тени.

Заключение

Проведено численное исследование ограниченных одномерных фотонных кристаллов с малым диэлектри-

ческим контрастом, содержащих подрешётки с разным периодом. Асимметричность системы приводит к изменению плотности фотонных состояний от частоты вплоть до увеличения в несколько раз в сравнении с симметричным случаем. В иридопластах увеличивается величина электромагнитного поля на одной из границ запрещённой зоны при увеличении асимметрии структуры. При появлении дефекта также увеличивается плотность фотонных состояний при увеличении асимметрии по толщинам на частоте дефектной моды.

Рост плотности фотонных состояний и амплитуды электромагнитного поля в иридопласте в спектральной зоне селективного отражения хлоропласта способствует увеличению фотосинтеза при дефиците света.

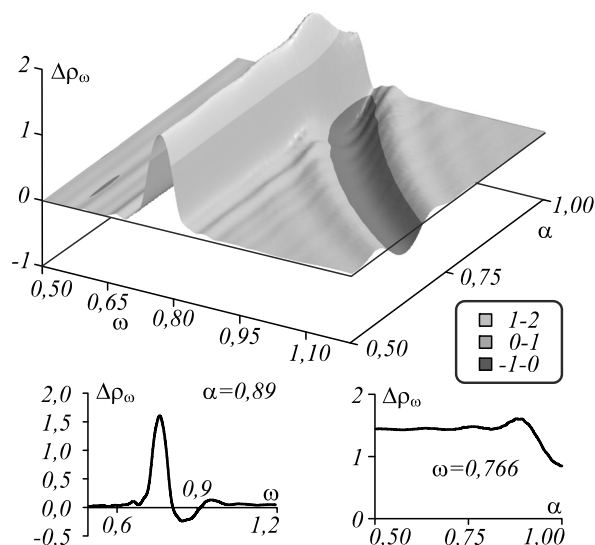


Рис. 9. Зависимость изменения среднеинтегральной разности плотности фотонных состояний от частоты и коэффициента удлинения первой подрешетки. Нижние графики – сечения при фиксированном параметре

Литература

1. **Mirkovic, T.** Light absorption and energy transfer in the antenna complexes of photosynthetic organisms / T. Mirkovic, E.E. Ostroumov, J.M. Anna, R. van Grondelle, Govindjee, G.D. Scholes // *Chemical Reviews*. – 2017. – Vol. 117, Issue 2. – P. 249-293.
2. **Буханов, Е.Р.** Оптические процессы в фотосинтезе / Е.Р. Буханов, М.А. Коршунов, А.В. Шабанов // *Сибирский лесной журнал*. – 2018. – № 5. – С. 19-32. – DOI: 10.15372/SJFS20180502.
3. **Jacobs, M.** Photonic multilayer structure of Begonia chloroplasts enhances photosynthetic efficiency / M. Jacobs, M. Lopez-Garcia, O.-P. Phrathap, T. Lawson, R. Oulton, H.M. Whitney // *Nature Plants*. – 2016. – Vol. 24, Issue 16162. – P. 1-6.
4. **Héban, C.** Ultrastructural basis and developmental control of blue iridescence in Selaginella leaves / C. Héban, D.W. Lee // *American Journal of Botany*. – 1984. – Vol. 71, Issue 2. – P. 216-219.
5. **Ghaffar, R.** Adaptive responses of mature giant chloroplasts in the deep-shade lycopod Selaginella erythropus to prolonged light and dark periods / R. Ghaffar, M. Weidinger, B. Mahner, M. Schagerl, I. Lichtscheidl // *Plant, Cell and Environment*. – 2018. – Vol. 41. – P. 1791-1805. – DOI: 10.1111/pce.13181.

6. **Glover, B.J.** Structural colour and iridescence in plants: the poorly studied relations of pigment colour / B.J. Glover, H.M. Whitney // *Annals of Botany*. – 2010. – Vol. 105. – P. 505-511. – DOI: 10.1093/aob/mcq007.
7. **Whitney, H.M.** Contributions of iridescence to floral patterning / H.M. Whitney, M. Kolle, R. Alvarez-Fernandez, U. Steiner, B.J. Glover // *Communicative & Integrative Biology*. – 2009. – Vol. 2. – P. 230-232. – DOI: 10.4161/cib.2.3.8084.
8. **Pao, S.-H.** Lamelloplasts and minichloroplasts in Begoniaceae: iridescence and photosynthetic functioning / S.-H. Pao, P.-Y. Tsai, C.-I. Peng, P.-J. Chen, C.-C. Tsai, E.-C. Yang, M.-C. Shih, J. Chen, J.-Y. Yang, P. Chesson, C.-R. Sheue // *Journal of Plant Research*. – 2018. – Vol. 131, Issue 4. – P. 655-670. – DOI: 10.1007/s10265-018-1020-2.
9. **Thomas, K.R.** Function of blue iridescence in tropical understorey plants / K.R. Thomas, M. Kolle, H.M. Whitney, B.J. Glover, U. Steiner // *Journal of The Royal Society Interface*. – 2010. – Vol. 7. – P. 1699-1707. – DOI: 10.1098/rsif.2010.0201.
10. **Vignolini, S.** Pointillist structural colour in Pollia fruit / S. Vignolini, P.J. Rudall, A.V. Rowland, A. Reed, E. Moyroud, R.B. Faden, J.J. Baumberg, B.J. Glover, U. Steiner // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – 2012. – Vol. 109, Issue 39. – P. 15712-15715. – DOI: 10.1073/pnas.1210105109.
11. **Lopez-Garcia, M.** Light-induced dynamic structural color by intracellular 3D photonic crystals in brown algae / M. Lopez-Garcia, N. Masters, H.E. O'Brien, J. Lennon, G. Atkinson, M.J. Cryan, R. Oulton, H.M. Whitney // *Science Advances*. – 2018. – Vol. 4, Issue 4. – eaan8917. – DOI: 10.1126/sciadv.aan8917.
12. **Allen, W.A.** Interaction of isotropic light with a compact plant leaf / W.A. Allen, H.W. Gausman, A.J. Richardson, J.R. Thomas // *Journal of the Optical Society of America*. – 1969. – Vol. 59, Issue 10. – P. 1376-1379. – DOI: 10.1364/JOSA.59.001376.
13. **Witt, H.T.** Primary acts of energy conservation in the functional membrane of photosynthesis / H.T. Witt. – In: *Bioenergetics of Photosynthesis* / ed. by Govindjee. – New York: Academic Press, 1975. – P. 493-554.
14. **Witt, H.T.** Energy conversion in the functional membrane of photosynthesis. Analysis by light pulse and electric pulse methods. The central role of the electric field / H.T. Witt // *Biochimica et Biophysica Acta*. – 1979. – Vol. 505, Issues 3-4. – P. 355-427.
15. **Елисеева, С.В.** Поля и спектры одномерного фотонного кристалла с дефектом инверсионного типа / С.В. Елисеева, В.А. Остаточников, Д.И. Семенов // *Компьютерная оптика*. – 2012. – Т. 36, № 1. – С. 14-20.
16. **Doskolovich, L.L.** Spatial differentiation of optical beams using phase-shifted Bragg grating / L.L. Doskolovich, D.A. Bykov, E.A. Bezus, V.A. Soifer // *Optics Letters*. – 2014. – Vol. 39, Issue 5. – P. 1278-1281. – DOI: 10.1364/OL.39.001278.
17. **Bykov, D.A.** Optical computation of the Laplace operator using phase-shifted Bragg grating / D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, E.A. Bezus, V.A. Soifer // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22, Issue 21. – P. 25084-25092. – DOI: 10.1364/OE.22.025084.
18. **Golovastikov, N.V.** Spatial optical integrator based on phase-shifted Bragg gratings / N.V. Golovastikov, D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, E.A. Bezus // *Optics Communications*. – 2015. – Vol. 338. – P. 457-460. – DOI: 10.1016/j.optcom.2014.11.007.
19. **Nasedkina, Y.F.** Transformation of a Gaussian pulse when interacting with a one-dimensional photonic crystal with an inversion defect / Y.F. Nasedkina, S.V. Eliseeva, D.I. Sementsov // *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*. – 2016. – Vol. 19. – P. 31-38.
20. **Dadoenkova, Yu.S.** Reshaping of Gaussian light pulses transmitted through one-dimensional photonic crystals with two defect layers / Yu.S. Dadoenkova, N.N. Dadoenkova, I.L. Lyubchanskii, D.I. Sementsov // *Applied Optics*. – 2016. – Vol. 55. – P. 3764-3770.
21. **Abram, R.A.** A study of a phase formalism for calculating the cumulative density of states of one-dimensional photonic crystals / R.A. Abram, A.A. Greshnov, S. Brand, M.A. Kaliteevski // *Journal of Modern Optics*. – 2017. – Vol. 64, Issue 15. – P. 1501-1509.
22. **Шабанов, А.В.** Исследование электромагнитного поля в одномерных фотонных кристаллах с дефектами / А.В. Шабанов, М.А. Коршунов, Е.Р. Буханов // *Компьютерная оптика*. – 2017. – Т. 41, №5. – С. 680-686. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-5-680-686.
23. **Bendickson, J.M.** Analytic expressions for the electromagnetic mode density in finite, one-dimensional, photonic band-gap structures / J.M. Bendickson, J.P. Dowling, M. Scalora // *Physical Review E*. – 1996. – Vol. 53. – P. 4107-4121.
24. **Шабанов, В.Ф.** Оптика реальных фотонных кристаллов. Жидкокристаллические дефекты, неоднородности / В.Ф. Шабанов, С.Я. Ветров, А.В. Шабанов. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2005. – 209 с. – ISBN: 5-7692-0737-X.
25. **Vats, N.** Theory of fluorescence in photonic crystals / N. Vats, S. John, K. Busch // *Physical Review A*. – 2002. – Vol. 65. – 043808.
26. **Schmidtke, J.** Fluorescence of a dye-doped cholesteric liquid crystal film in the region of the stop band: theory and experiment / J. Schmidtke, W. Stille // *The European Physical Journal B*. – 2003. – Vol. 31. – P. 179-194. – DOI: 10.1140/epjb/e2003-00022-x.
27. **D'Aguanno, G.** Density of modes and tunneling times in finite one-dimensional photonic crystals: A comprehensive analysis / G. D'Aguanno, N. Mattiucci, M. Scalora, M.J. Bloemer, A.M. Zheltikov // *Physical Review E*. – 2004. – Vol. 70. – 016612.
28. **D'Aguanno, G.** Photonic band edge effects in finite structures and applications to x^2 interactions / G. D'Aguanno, M. Centini, M. Scalora, C. Sibia, Y. Dumeige, P. Vidakovic, J.A. Levenson, M.J. Bloemer, C.M. Bowden, J.W. Haus, M. Bertolotti // *Physical Review E*. – 2001. – Vol. 64. – 016609.
29. **Kirchhoff, H.** Dynamic control of protein diffusion within the granal thylakoid lumen / H. Kirchhoff, C. Hall, M. Wood, M. Herbstová, O. Tsabari, R. Nevo, D. Charuvi, E. Shimoni, Z. Reich // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – 2011. – Vol. 108, Issue 50. – P. 20249-20253.

Сведения об авторах

Шабанов Александр Васильевич. К.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, Лаборатория молекулярной спектроскопии. Область научных интересов: физика, программирование. E-mail: alexch_syb@mail.ru.

Коршунов Михаил Анатольевич. К.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, Лаборатория молекулярной спектроскопии. Область научных интересов: физика, программирование. E-mail: kors@iph.krasn.ru.

Буханов Евгений Романович. Магистерская степень, инженер, ФИЦ КНЦ СО РАН, Отдел молекулярной электроники. Область научных интересов: программирование, физика, дендрохронология. E-mail: k26tony@ya.ru.

ГРПТИ: 29.31.27.

Поступила в редакцию 20 августа 2018 г. Окончательный вариант – 19 марта 2019 г.

Features of the amplification of the electromagnetic field and the density of states of photonic crystal structures in plants

A.V. Shabanov¹, M.A. Korshunov¹, E.R. Bukhanov²

¹ Kirensky Institute of Physics, FRC KSC SB RAS, 660036, Krasnoyarsk, Russia, Akademgorodok 50/12,

² Federal Research Center KSC SB RAS, 660036, Krasnoyarsk, Russia, Akademgorodok 50

Abstract

Calculations were performed using the transfer matrix of one-dimensional photonic crystals with low contrast and asymmetric structures of different periods. Such structures have been found in many plants. When joining two successively connected sublattices with different periods, an increase is observed in the amplitude of the electromagnetic field and the density of photon states inside the structure, and their change depends on the asymmetry of the thickness of the sublattices.

Keywords: photonic crystal, defect mode, photonic band gap, layered periodic structures, density of states.

Citation: Shabanov AV, Korshunov MA, Bukhanov ER. Features of the amplification of the electromagnetic field and the density of states of photonic crystal structures in plants. *Computer Optics* 2019; 43(2): 231-237. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-2-231-237.

References

- [1] Mirkovic T, Ostroumov EE, Anna JM, van Grondelle R, Govindjee, Scholes GD. Light absorption and energy transfer in the antenna complexes of photosynthetic organisms. *Chem Rev* 2017; 117(2): 249-293.
- [2] Bukhanov ER, Korshunov MA, Shabanov AV. Optical processes in photosynthesis [In Russian]. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* 2018; 5: 19-32. DOI: 10.15372/SJFS20180502.
- [3] Jacobs M, Lopez-Garcia M, Phrathep O-P, Lawson T, Oulton R, Whitney H.M. Photonic multilayer structure of Begonia chloroplasts enhances photosynthetic efficiency. *Nature Plants* 2016; 24(16162): 1-6.
- [4] Hébant C, Lee DW. Ultrastructural basis and developmental control of blue iridescence in Selaginella leaves. *Am J Bot* 1984; 71(2): 216-219.
- [5] Ghaffar R, Weidinger M, Mahner B, Schagerl M, Lichtscheidl I. Adaptive responses of mature giant chloroplasts in the deep-shade lycopod Selaginella erythropus to prolonged light and dark periods. *Plant Cell Environ* 2018; 41: 1791-1805. DOI: 10.1111/pce.13181.
- [6] Glover BJ, Whitney HM. Structural colour and iridescence in plants: the poorly studied relations of pigment colour. *Ann Bot* 2010; 105: 505-511. DOI: 10.1093/aob/mcq007.
- [7] Whitney HM, Kolle M, Alvarez-Fernandez R, Steiner U, Glover BJ. Contributions of iridescence to floral patterning. *Commun Integr Biol* 2009; 2: 230-232. DOI: 10.4161/cib.2.3.8084.
- [8] Pao S-H, Tsai P-Y, Peng C-I, Chen P-J, Tsai C-C, Yang E-C, Shih M-C, Chen J, Yang J-Y, Chesson P, Sheue C-R. Lamelloplasts and minichloroplasts in Begoniaceae: iridescence and photosynthetic functioning. *J Plant Res* 2018; 131(4): 655-670. DOI: 10.1007/s10265-018-1020-2.
- [9] Thomas KR, Kolle M, Whitney HM, Glover BJ, Steiner U. Function of blue iridescence in tropical understory plants. *J R Soc Interface* 2010; 7: 1699-1707. DOI: 10.1098/rsif.2010.0201.
- [10] Vignolini S, Rudall PJ, Rowland AV, Reed A, Moyroud E, Faden RB, Baumberg JJ, Glover BJ, Steiner U. Pointillist structural colour in Pollia fruit. *PNAS* 2012; 109(39): 15712-15715. DOI: 10.1073/pnas.1210105109.
- [11] Lopez-Garcia M, Masters N, O'Brien HE, Lennon J, Atkinson G, Cryan MJ, Oulton R, Whitney HM. Light-induced dynamic structural color by intracellular 3D photonic crystals in brown algae. *Science Advances* 2018; 4(4): eaan8917. DOI: 10.1126/sciadv.aan8917.
- [12] Allen WA, Gausman HW, Richardson AJ, Thomas JR. Interaction of isotropic light with a compact plant leaf. *J Opt Soc Am* 1969; 59(10): 1376-1379. DOI: 10.1364/JOSA.59.001376.
- [13] Witt HT. Primary acts of energy conservation in the functional membrane of photosynthesis. In Book: Govindjee, ed. *Bioenergetics of Photosynthesis*. New York: Academic Press; 1975: 493-554.
- [14] Witt HT. Energy conversion in the functional membrane of photosynthesis. Analysis by light pulse and electric pulse methods. The central role of the electric field. *Biochim Biophys Acta* 1979; 505(3-4): 355-427.
- [15] Eliseeva SV, Ostatochnicov VA, Sementsov DI. Field and spectra of one-dimensional photonic crystal with inversion type defect [In Russian]. *Computer Optics* 2012; 36(1): 14-20.
- [16] Doskolovich LL, Bykov DA, Bezus EA, Soifer VA. Spatial differentiation of optical beams using phase-shifted Bragg grating. *Opt Lett* 2014; 39(5): 1278-1281. DOI: 10.1364/OL.39.001278.

- [17] Bykov DA, Doskolovich LL, Bezus EA, Soifer VA. Optical computation of the Laplace operator using phase-shifted Bragg grating. *Opt Express* 2014; 22(21): 25084-25092. DOI: 10.1364/OE.22.025084.
- [18] Golovastikov NV, Bykov DA, Doskolovich LL, Bezus EA. Spatial optical integrator based on phase-shifted Bragg gratings. *Opt Commun* 2015; 338: 457-460. DOI: 10.1016/j.optcom.2014.11.007.
- [19] Nasedkina YF, Eliseeva SV, Sementsov DI. Transformation of a Gaussian pulse when interacting with a one-dimensional photonic crystal with an inversion defect. *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications* 2016; 19: 31-38.
- [20] Dadoenkova YuS, Dadoenkova NN, Lyubchanskii IL, Sementsov DI. Reshaping of Gaussian light pulses transmitted through one-dimensional photonic crystals with two defect layers. *Appl Opt* 2016; 55: 3764-3770.
- [21] Abram RA, Greshnov AA, Brand S, Kaliteevski MA. A study of a phase formalism for calculating the cumulative density of states of one-dimensional photonic crystals. *J Mod Opt* 2017; 64(15): 1501-1509.
- [22] Shabanov AV, Korshunov MA, Bukhanov ER. Investigation of the electromagnetic field in single-dimensional photonic crystals with defects. *Computer Optics* 2017; 41(5): 680-686. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-5-680-686.
- [23] Bendickson JM, Dowling JP, Scalora M. Analytic expressions for the electromagnetic mode density in finite, one-dimensional, photonic band-gap structures. *Phys Rev E* 1996; 53: 4107-4121.
- [24] Shabanov VF, Vetrov SYa, Shabanov AV. Optics of real photonic crystals [In Russian]. Novosibirsk: "Izdatelstvo SB RAS: Publisher; 2005.
- [25] Vats N, John S, Busch K. Theory of fluorescence in photonic crystals. *Phys Rev A* 2002; 65: 043808.
- [26] Schmidtke J, Stille W. Fluorescence of a dye-doped cholesteric liquid crystal film in the region of the stop band: theory and experiment. *Eur Phys J B* 2003; 31: 179-194. DOI: 10.1140/epjb/e2003-00022-x.
- [27] D'Aguanno G, Mattiucci N, Scalora M, Bloemer MJ, Zheltikov AM. Density of modes and tunneling times in finite one-dimensional photonic crystals: A comprehensive analysis. *Phys Rev E* 2004; 70: 016612.
- [28] D'Aguanno G, Centini M, Scalora M, Sibilia C, Dumeige Y, Vidakovic P, Levenson JA, Bloemer MJ, Bowden CM, Haus JW, Bertolotti M. Photonic band edge effects in finite structures and applications to x^2 interactions. *Phys Rev E* 2001; 64: 016609.
- [29] Kirchhoff H, Hall C, Wood M, Herbstová M, Tsabari O, Nevo R, Charuvi D, Shimoni E, Reich Z. Dynamic control of protein diffusion within the granal thylakoid lumen. *PNAS* 2011; 108(50): 20249-20253.

Authors' information

Alexandr Vasilievich Shabanov, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Senior Research Officer, Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS, Laboratory of Molecular Spectroscopy. His research interests are currently focused on computer physics. E-mail: alexch_syb@mail.ru.

Mikhail Anatolievich Korshunov, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Senior Research Officer, Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS, Laboratory of Molecular Spectroscopy, His research interests are currently focused on computer physics. E-mail: kors@iph.krasn.ru.

Eugene Bukhanov, Master degree, Engineer, Federal Research Center KSC SB RAS, Department of molecular electronic. His research interests are currently focused on computer physics and dendrochronology. E-mail: k26tony@ya.ru.

Received August 20, 2018. The final version – March 19, 2019.