

Влияние строения на оптические свойства эпителикулярного воска голубой ели (*Picea pungens*)

Е. Р. Буханов^{1,*}, А. В. Шабанов^{1,†}, М. Н. Крахалев^{1,‡}, М. Н. Волочаев¹, Ю. Л. Гуревич²

¹Институт физики имени Л. В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН

Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, д. 50/12

²ФИЦ КЦН СО РАН, Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, д. 50

(Статья поступила 30.07.2019; Подписана в печать 24.09.2019)

Выполнено исследование морфологических и оптических характеристик с эпителикулярного воскового слоя голубой ели (*Picea pungens*). Методом сканирующей электронной микроскопии выявлены структурные единицы — трубочки диаметром 150–200 нм и длиной 3–5 мкм. Обнаружен эффект иризации от доменов воскового слоя. В отраженном свете домены имеют голубую окраску, при наблюдении в проходящем свете приобретают розоватый оттенок. Эти оптические характеристики являются основными признаками фотоннокристаллической структурой. Проведено численное моделирование спектра пропускания с выявленными структурными оптическими параметрами с использованием метода трансфер матриц. Спектр максимума флуоресценции совпадает с дефектной модой рассчитанного спектра пропускания.

PACS: 78.67.Pt

УДК: 535.3.

Ключевые слова: фотонный кристалл, дефектная мода, изоляция воскового слоя, иризация, флуоресценция.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время внимание многих исследователей привлечено к изучению влияния структуры зеленого листа растений на эффективность фотосинтеза. Современные состояния и проблемы наиболее полно представлены в обзорах [1, 2]. Особый интерес представляет первый оптический этап фотосинтеза, который оказался наименее изученным из-за сложности строения и большого изменения структурных параметров под влиянием внешних воздействий.

Благодаря современному развитию экспериментальных методов электронной микроскопии в условиях низких температур выявлена длиннопериодическая структура в иридопластах и хлоропластах [3], в которых и происходит фотосинтез. Структурными элементами являются слои с различными диэлектрическими проницаемостями [3]. Наличие в веществе периодичности с периодом близким к длине электромагнитной волны приводит к формированию разрешенных и запрещенных фотонных зон [4]. Предложенное Яблоновичем [5] интригующее название таких структур фотонными кристаллами получило широкое признание и вызвало дополнительный интерес к исследованию их свойств. Бурному развитию работ этого направления способствовали ранее установленные возможности управления скоростью оптического излучения атомов и локализации электромагнитных волн на дефектах решетки [6–8]. Успешному поиску объектов с уникальными характеристиками способствуют новые математические методы моделирования фотонных кристал-

лов [9], а так же расширение способов внешнего воздействия и учет резонансных явлений [10–13].

Используя метод трансфер-матриц [14] авторам работ [15, 16] удалось объяснить ряд особенностей в поведении оптических характеристик электромагнитного излучения, распространяющегося в хлоропластах: усиление электромагнитного поля и увеличение плотности фотонных состояний внутри структуры и их изменение в зависимости от асимметрии толщин подрешеток и дефектов.

Между тем влияние надклеточной структуры зеленого листа является малоизученным в основном из-за сложного внутреннего строения, хотя в работах [17–20] отмечается многообразная роль воскового слоя для растений, начиная с защиты от избыточной влаги и засухи, насекомых вредителей, светового фильтра и вплоть до повышения фотосинтеза.

Целью настоящей работы является исследование структурных характеристик восковых слоев и установления их связей с оптическими и спектральными свойствами.

1. ПОЛУЧЕНИЕ ВОСКОВЫХ СЛОЕВ

В качестве материала для исследования были собраны свежие иголки полувзрослой голубой ели (*P. pungens*), растущей в естественной среде. Отбирались только те иголки, где было отчетливо видно наличие голубого оттенка на протяжении всей иголки свидетельствующее о неповрежденности эпителикулярного воска.

В большинстве случаев для отделения воскового слоя используют органические вещества или растворы. Большим недостатком простых методов является захват слишком большой области, загрязнение используемыми препаратами, что усложняет проведение коли-

*E-mail: k26tony@ya.ru

†E-mail: alexch_syb@mail.ru

‡E-mail: kmn@iph.krasn.ru

чественных спектральных измерений. Одним из приемлемых способов является использование сахарного раствора [21]. Сироп проникает внутрь структуры и при засыхании сахар начинает кристаллизоваться, благодаря чему происходит отщелкивание малейших образований, вплоть до отдельных нанотрубок, однако и в этом случае сахар оказывает сильное влияние на результаты оптических измерений. Авторы, предложившие этот метод, отмечают большие затруднения при удалении даже в случае многократной промывки водой. Использование органических растворителей приводит к образованию новых химических соединений и разрушению внутренней восковой структуры. Наш взгляд наиболее удачным приемом является использование дистиллированной воды в качестве инертного чистого материала проникающего под действием капиллярных сил вглубь структуры и легко удаляемого при вакуумной сушке.

Образцы были помещены в сосуд с дистиллированной водой и выдерживались в воде не менее 5 часов. После чего производилось охлаждение воды ниже температуры замерзания. В процессе превращения воды в лед происходит расширение, в результате чего отрываются восковые пластинки. После оттаивания оторванные пластинки всплывали на поверхность, где и были собраны на подложки.

Пластинки всплывают на поверхность поскольку их объемная плотность меньше плотности воды и их энергия взаимодействия с водой меньше энергии взаимодействия как с металлическими, так и кварцевыми подложками, поэтому они к последним прилипают.

Были использованы три типа подложек: для оптических исследований — кварцевая; для электронной микроскопии высокого разрешения — металлическая; для контрольной группы образцов использовалось стекло с электропроводящим ито-покрытием для проведения как оптических, так и электронных методов исследования над одним и тем же образцом.

2. СТРУКТУРНО–МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВОСКОВОГО СЛОЯ

Структурно-морфологические исследования воскового покрытия выполнены методами сканирующей электронной микроскопии на приборе Hitachi SU3500 (ускоряющее напряжение 10 кВ, W–катод) и сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения Hitachi S-5500 (ускоряющее напряжение 30 кВ, катод с полевой эмиссией).

При этом происходит бомбардировка твердого материала заряженными частицами. Плотность энергии, приходящейся на образец, такова, что возможны как фазовый переход в веществе, так и его химическая деструкция. Органические материалы в этом смысле — одни из самых неудобных объектов исследования. Для получения данных о морфологии живых клеток и оргanelл их приходится мумифицировать. Руко-

творные окаменелости благодаря использованию различных физико–химических процессов делаются неоднородными по элементному составу. Различные атомы (маркеры) соотносятся с различными органическими материалами исходной живой ткани. В ходе пробоподготовки (которая занимает десятки и сотни часов) нет никакой гарантии сохранения размеров и пропорций первоначальных объектов.

Шаг, позволяющий минимизировать искажения, использование для отверждения органики тех же процессов, которые происходят в природе. Самые элементарные в этом смысле методы — это аккуратная сушка и взрывная заморозка. Далее стоит задача обеспечения сохранности образца при наблюдении в электронном микроскопе. Используются насыщенный водяной пар в камере (для влажных образцов), криогенные столики и малые энергии токов.

Наблюдения морфологии восковых проявлений на поверхности листа была нами ограничены объектами, которые прошли естественную сушку поверхности — голубая хвоя, собранная в зимний период. Отсутствие химического влияния и воздействия растворителей позволяет нам предположить, что в итоге мы получили минимально искаженные образцы для электронной микроскопии.

Детектирование вторичных электронов в глубоком вакууме позволяет повысить разрешение микроскопа. Достаточно низкие значения ускоряющего напряжения и тока пучка не вызывают плавление вещества, а гладкая подложка не вносит геометрических искажений.

Рис. 1, полученный с поверхности хвои, свидетельствует о трубчатой структуре воскового покрытия. Характерный внешний диаметр трубочек по оценке составляет 150 нм, длина 3–5 мкм. Расстояние вглубь между нанотрубками варьируется от 0 до 300 нм.

3. ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОСКОВОГО СЛОЯ

3.1 Поляризационная микроскопия

Оптические наблюдения восковых пластинок проводились в проходящем и отраженном свете на микроскопе Axio Imager.A1m (Zeiss) с использованием объектива 50x/0.8. Наблюдения проводились в неполяризованном свете и поляризованном свете в геометрии скрещенных поляризаторов. Большая часть восковых пластинок образует большие неоднородные области, сильно рассеивающие свет. Одновременно с этим наблюдаются домены размером от 1 до 4 мкм, расположенные отдельно или образующие небольшие конгломераты (рис. 2). В отраженном свете домены имеют голубой (сине–зеленый) цвет (рис. 2,а), при этом в проходящем свете они окрашиваются в розовый цвет (рис. 2,б). В отраженном свете максимальная яркость домена наблюдается в его центре, что соответствует наиболее сильному окрасу домена в проходящем свете.

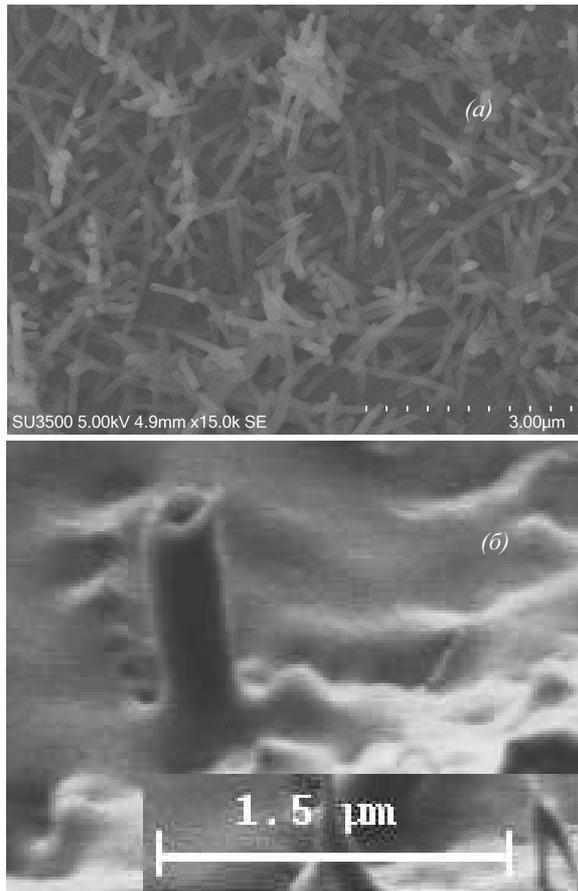


Рис. 1: Фотография структуры воска, состоящего из нанотрубочек, сделанная с помощью электронного микроскопа Hitachi SU3500 (а), фотография отдельной нанотрубочки сделанной с помощью электронного микроскопа Hitachi S-5500 (б)

На рис. 2,б показана фотография доменов, сделанная в проходящем поляризованном свете в геометрии скрещенных поляризаторов. Оптическая картина доменов имеет четыре темных линии, выходящих из центра доменов. Одна пара линий преимущественно параллельна поляризатору, в то время как вторая — анализатору. При повороте образца по отношению к поляризаторам оптическая картина практически не изменяется. Данный факт говорит о наличии оптической анизотропии доменов, с аксиальной симметрией в распределении оптической оси в пределах одного домена. В отраженном свете в геометрии скрещенных поляризаторов домены практически не видны, что говорит о незначительном изменении поляризации света при отражении.

Оптические свойства доменов, продемонстрированные на рис. 2, а также иризация в оптическом диапазоне являются следствием фотоннокристаллической структуры. Период данной структуры определяется диаметром нанотрубочек 150–200 нм. Хаотическая ориентация их длинных осей в слое позволяет использовать одномерную модель для расчета спектра пропускания фотонного кристалла. Возможная межслоевая однородность приводит к образованию дефекта, что также необходимо учитывать при расчетах.

3.2. Расчет спектральных характеристик

В данной статье рассматривалось нормальное падение света в немагнитной среде ($\mu = 1$), состоящей из слоев толщиной L_N и 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]:

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

где E — распределение электрического поля в каждом из слоев структуры, H — распределение магнитного поля в каждом из слоев структуры, $\omega = 2\pi\nu\chi$, χL_N — линейный размер слоев, ν — частота, c — скорость света в вакууме.

Зная, что на выходе из структуры существует только исходящая волна ($A_{out} = 1$; $B_{out} = 0$), проведя чис-

ленные расчеты, можно получить массив относительных значений амплитуд в каждом из слоев фотонного кристалла. Это позволяет найти распределение электромагнитного поля в слоистой структуре и спектр ее пропускания. Коэффициент пропускания без учета поглощения k_T [23, 24] (обязательное условие: показатели преломления сред до и после образца — одинако-

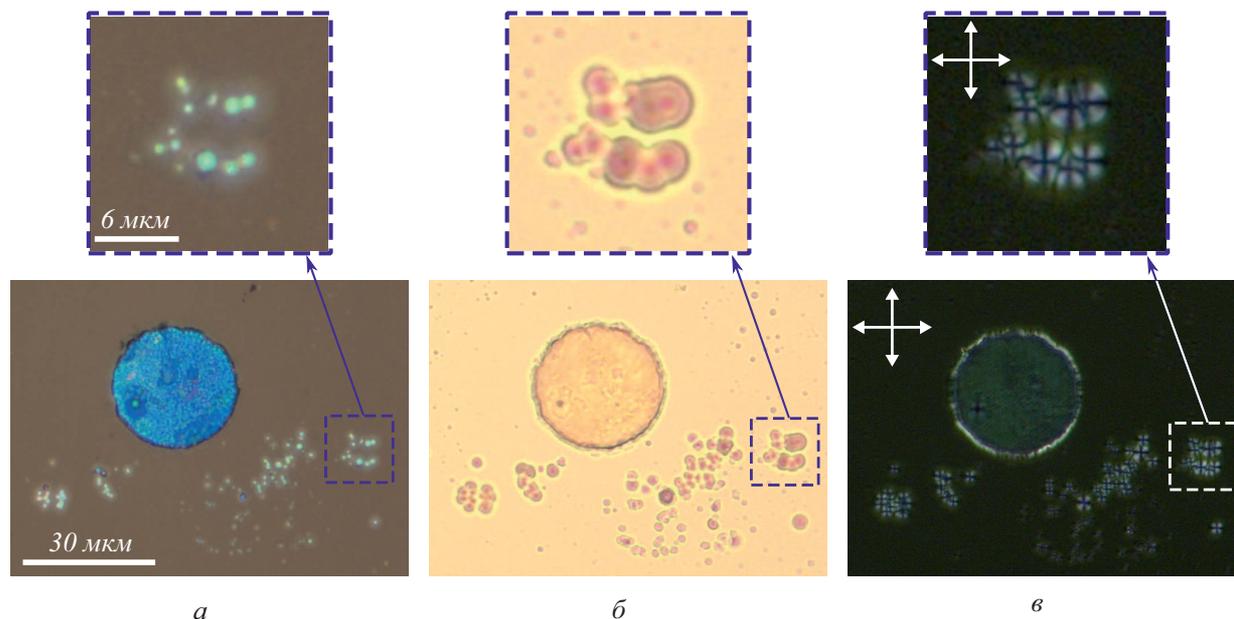


Рис. 2: Фотографии доменов воска на стеклянной подложке, сделанные в отраженном (а), проходящем неполяризованном свете (б) и поляризованном свете в геометрии скрещенных поляризаторов (в). Увеличенный участок (верхний ряд) фотографии с доменами и их конгломератами (нижний ряд). Направления поляризаторов обозначены двойными стрелками

вы):

$$k_T = |A_0|^{-2}. \quad (2)$$

Результаты расчетов представлены на рис. 3.

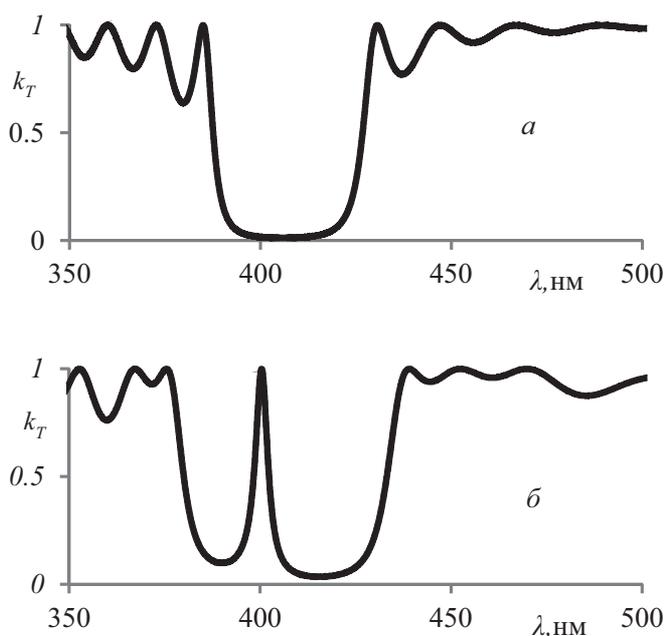


Рис. 3: Спектр пропускания для среды, а — состоящей из чередующихся слоев, б — состоящей из чередующихся слоев с дефектом посередине

3.3. Флуоресценция

Спектры флуоресценции снимались на спектрофлуориметре Shimadzu RF-6000. На рис. 4 представлен спектр флуоресценции от исследуемых образцов голубой ели возбужденный светом на длине волны 290 нм. Как видно из рисунка в спектре флуоресценции наблюдается полоса в области 400 нм.

В работе [22] изучались отражение и пропускание ультрафиолетовых волн для кутикулы листьев различных растений. Во многих случаях было установлено, что поглощение ультрафиолета на восковом слое составляет около 94 %.

Таким образом восковой слой растения поглощая коротковолновый свет защищает внутреннюю структуру клеток от ультрафиолетового излучения и в тоже время флуоресцируя переводя его в длину волны видимой области тем самым увеличивая эффективность фотосинтеза.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Представленные уникальные оптические и спектральные результаты безусловно связаны со структурой воска. Исследование структурных характеристик воска рассмотрены в ряде работ [23–25]. Наши результаты по исследованию морфологических характеристик находятся в хорошем согласии с данными работ [23–25], а именно, структурными единицами воска являются нанотрубки и наностержни с внешним диаметром 140–160 нм. Характерно, что растительные ку-

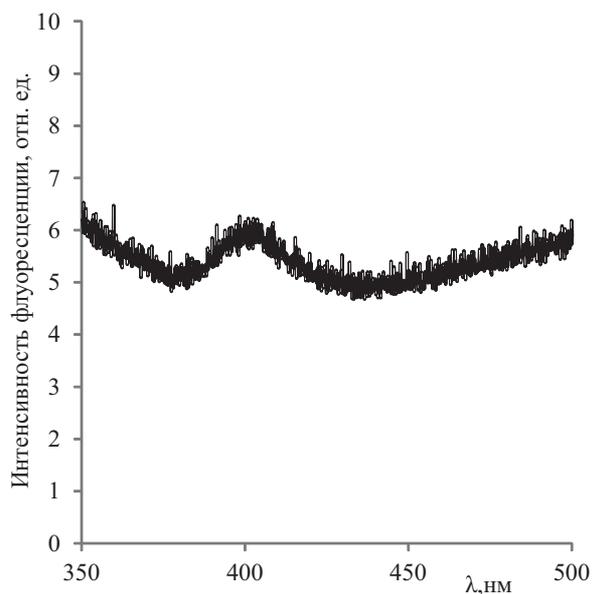


Рис. 4: Спектр интенсивности флуоресценции. Возбуждение происходило на длине волны 290 нм. Пик эмиссии 400 нм. Шель эмиссии — 50 нм. Интервал данных 0.2 нм

тикулярные воски состоят из сложной смеси длинноцепочечных алифатических соединений, которые можно классифицировать в соответствии с типом функциональных групп, структурой и распределением гомологов [26]. Кроме того, циклические соединения часто присутствуют в различных количествах. В работе [26] сообщается о том, что восковые единицы в результате самоорганизации могут образовывать анизотропные кристаллы. Детальное изучение механизмов самоорганизации восковых структурных единиц проведено в работе [27], в которой предложено экстрагировать восковой слой с помощью хлороформа и осаждать его на различных подложках, выращивая структурные комплексы. Выращены структуры воска на кремнии, графите и парафине. Эксперименты показали, что морфология рекристаллизации кристаллов на парафине, аналогична как на поверхности растений, но на других подложках было замечено большое отличие касательной ориентации трубочек и их пространственному распределению. Также в работе Коха [27] подробно был изучен механизм роста восковых трубок. Стержни формируют кольцевые структуры. Эти круговые структуры возникли из-за одновременного растворения одного конца стержня, в то время как другой конец начал формировать изогнутую линию. Когда эта изогнутая линия закрылась кругом, воски начали расти в высоту.

Кох и соавторы [27] продемонстрировали вертикальную ориентацию трубочек на высоко ориентированном пиролитическом графите (HOPG). Используя режим атомно-силовой микроскопии (AFM), они наблюдали непрерывный рост трубочек после нанесения 10 мкл капли (конц. 1,5 мг/мл) на поверхность HOPG. Кроме того, они также наблюдали увеличение гидрофобности

восковых структур, о чем свидетельствует увеличение угла контакта с 88° до 129° после 14 дней перекристаллизации воска на HOPG.

В работе [28] представлены интересные исследования о влиянии концентрации раствора и примеси на скорость роста. Временная зависимость образования трубочек из воска после перекристаллизации из различных растворов на основе хлороформа на поверхности HOPG при комнатной температуре была исследована с помощью атомно-силовой микроскопии (режим магнитного переменного тока), получая серии последовательных изображений процесса образования. Рост трубочек, ориентированных вертикально, следует последовательному поведению стержень > кольцо > трубочка. Влияние ряда факторов, например, различной концентрации воска в хлороформе, дополнительного присутствия воды или солей $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4, \text{NH}_4\text{NO}_3]$ или смеси соли/воды в растворе, на скорость роста и ориентацию трубочек также исследованы. Было обнаружено, что различные концентрации воска не влияют на скорость роста или ориентацию канальцев ни в одном из растворов. Присутствие воды, однако, значительно увеличивало скорость роста образования трубочек, в то время как присутствие соли не влияет на скорость роста или ориентацию трубочек.

В природе известны растения голубая окраска которых обусловлена строением клетки хлоропласта [29, 30]. Было замечено, что голубой или сине-зеленый цвет зачастую присущ растениям растущим в тени [31]. Ранее эту особенность приписывали химической составляющей растения или же примесям находящейся в растениях. В 2016 году группе ученых [3] благодаря современным крио технологиям и современной биологической микроскопии удалось получить снимки наноструктуры основных клеток, отвечающих за фотосинтез — хлоропластов и, в частности, иридопласта. На этих снимках они заметили, фотоннокристаллическую структуру, период которой соизмерим по своей длине волны с цветом наблюдаемом на растении бегония. После, данная работа породила серию исследований схожих растений где были найдены подобные структуры, например бизонопласты и гигантские хлоропласты. В том числе авторами работы [3], позже была выпущена подобная статья [32] по изучению хлоропластов в растении *Selaginella erythrorus*, в которой они также связали окраску цветка со строением клетки. В дополнение к ранее опубликованным работам по структуре воска наши результаты выявили основную особенность, а именно фотоннокристаллическую структуру. Также наряду с данными экспериментальными работами был опубликован ряд теоритических работ [16–18, 33, 34] в которых были рассмотрены различные аспекты хлоропластов. Во всех этих работах связывают внутренние клетки растений по отдельности связывают с характеристиками растений, но лишь в работе [15] была попытка просчитать совокупность клеток в бегонии, что показало более ярки эффект при создании асимметрии в качестве нескольких отличных друг от

друга клеток и расстояния между ними. Однако практически все существующие растения покрывает специфический слой эпителикулярного воска который имеет свои собственные оптические характеристики и который является своего рода барьером для света при попадании вглубь растения. Таким образом представляло интерес изучить эти оптические характеристики воскового слоя для понимания какие длины волн могут проходить через него, а какие поглощаются и отражаются. Также наличие фотонной структуры в восковом слое может создавать первоначальный резонанс для световой волны проходящей через растение, что тоже может оказывать определенное воздействие на внутренние клетки.

Выявленная эффективная флуоресценция на линии 400 нм хорошо объясняется результатами работы [35], в которой рассмотрена связь между линией флуоресценции и плотностью фотонных состояний.

Что касается других практических применений воска, они представлены в работе [36] были исследованы гидрофобные способности воска. Это предварительное исследование показало, что поверхностные особенности и свойства эпителикулярных восков листьев могут быть эффективно воспроизведены. Собранный воск можно использовать для обеспечения плавучести для плоской платформы, а также для потенциального

применения для покрытия каналов в микрофлюидных устройствах. Результаты изучения уникальных поверхностных свойств листового воска могут быть применены к таким проблемам, как уменьшение сопротивления жидкости, усиление водоподдерживающих сил и антибиофилирование корпусов судов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана технология получения чистых восковых слоев. Исследованы их морфологические и оптические характеристики. Элементарной структурной единицей слоя являются нанотрубка с характерным внешним диаметром 150-200 нм. Выполнено численное моделирование спектров пропускания ограниченных одномерных фотонных кристаллов с параметрами выявленных нанотрубок. Под воздействием ультрафиолетового излучения в восковом слое проявляется интенсивная флуоресценция в оптической области, что повышает эффективность фотосинтеза.

Благодарности

Исследования были выполнены на оборудовании центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

- [1] *Mirkovic T., Ostroumov E. E., Anna J. M., van Gron-delle R., Govindjee, Scholes G. D.* // Chem. Rev. 2017. **117**, N 2. P. 249.
- [2] *Буханов Е. Р., Коршунов М. А., Шабанов А. В.* // Сибирский лесной журнал. 2018. № 5. С. 19.
- [3] *Jacobs M., Lopez-Garcia M., Phrathep O.-P., Lawson T., Oulton R., Whitney H. M.* // Nature Plants. 2016. **24**, N 16162. P. 1.
- [4] *Шабанов В. Ф., Ветров С. Я., Шабанов А. В.* // Новосибирск: Издательство СО РАН, 2005. .
- [5] *Yablonovitch E.* // Phys. Rev. Lett. 1987. **58**, N 20. P. 2059.
- [6] *Рытов С. М.* // ЖЭТФ. 1955. **29**, № 11. С. 25.
- [7] *Бреховских Л. М.* Волны в слоистых средах. М.: Изд-во АН СССР, 1957.
- [8] *Быков В. П.* // Квантовая электроника. 1975. **4**. С. 861.
- [9] *Боголюбов А. Н., Деменева Ю. С.* // Физические основы приборостроения. 2016. **5**, № 4. С. 41.
- [10] *Сылгачева Д. А., Хохлов Н. Е., Калиш А. Н., Белотелов В. И.* // ЖЭТФ/JETP. 2016. **150**, № 5. С. 851.
- [11] *Knyazev G. A. et al.* // ACS Photonics. 2018. **5**, N 12. P. 4951.
- [12] *Захаров П. Н., Королев А. Ф., Крамаренко Е. Ю., Митрофанов Е. В., Радковская А. А., Сысов Н. Н., Черепенин В. А., Шалыгин А. Н., Шалыгина (Чепурова) Е. Е.* // Успехи современной радиоэлектроники. 2017. № 3. С. 71.
- [13] *Белотелов В. И., Звездин А. К.* Фотонные кристаллы и другие метаматериалы. М.: Бюро Квантум. 2006.
- [14] *Yeh P., Yariv A., Hong Ch.-Sh.* // Journal of the Optical Society of America. 1977. **67**, N 4. P. 423.
- [15] *Шабанов А. В., Коршунов М. А., Буханов Е. Р.* // Компьютерная оптика. 2019. **43**, №2. С. 231.
- [16] *Коршунов М. А., Шабанов А. В., Буханов Е. Р., Шабанов В. Ф.* // ДАН. 2018. **478**. № 3. С. 280.
- [17] *Weaver J. M., Lohrey G., Tomasi P., Dyer J. M., Jenks M. A., Feldmann K. A.* // Industrial Crops & Products. 2018. **117**. P. 310.
- [18] *Reicosky D. A., Hanover J. W.* // Plant Physiol. 1978. **62**. P. 101.
- [19] *Harrington C. A., Carlson W. C.* // Northwest Science. 2015. **89**, N 4. P. 401.
- [20] *Dragota S., Riederer M.* // Australian Journal of Botany. 2008. **56**. P. 644.
- [21] *Coward J. L.* // Flora–Morphology Distribution Functional Ecology of Plants. 2007. **202**, N 6. P. 462.
- [22] *Grant R. H., Heisler G. M., Gao W., Jenks M.* // Agricultural and Forest Meteorology. 2003. **120**. P. 127.
- [23] *Ensikat H. J., Neinhuis C., Barthlott W.* // Int. J. Plant Sci. 2000. **161**, N 1. P. 143.
- [24] *Koch K., Barthlott W., Koch S., Hommes A., Wandelt K., Mamdouh W., De-Feyter S., Broekman P.* // Planta. 2006. **223**. P. 258.
- [25] *Ensikat H. J., Boese M., Mader W., Barthlott W., Koch K.* // Chemistry and Physics of Lipids. 2006. **144**. P. 45.
- [26] *Dragota S., Riederer M.* // Australian Journal of Botany. 2008. **56**. P. 644.
- [27] *Koch K., Dommissie A., Barthlott W.* // Crystal Growth & Design. 2006. **6**. P. 2571.
- [28] *Dora S. K., Koch K., Barthlott W., Wandelt K.* // Beilstein J. Nanotechnol. 2018. **9**. P. 468.
- [29] *Hübant C., Lee D. W.* // Am. J. of Botany. **71**. P. 216.

- [30] Gould S.K., Lee D.W. // Am. J. of Botany. **83**. P. 45.
[31] Thomas K.R., Kolle M., Whitney H.M., Glover B.J., Steiner U. // J. Roy. Soc. Interface. **7**. P. 1699.
[32] Masters N.J., Lopez-Garcia M., Oulton R., Whitney H.M. // J. Roy. Soc. Interface. 2018. **15**. 20180559.
[33] Shabanov A.V., Korshunov M.A., Bukhanov E.R. // Computer Optics. 2017. **41**. P. 680.
[34] Capretti A., Ringsmuth A.K., van Velzen J.F., Rosnik A., Croce R., Gregorkiewicz T. // Light: Science & Applications. 2019. **8**, N5. P. 13.
[35] Долганов П.В. // Письма в ЖЭТФ. **105**. С. 616.
[36] Poiner E., Le X.T., Fawcett D. // Nanotechnology, Science and Applications. **4**. P. 113.

The effect of the structure on the optical properties of epicular blue spruce wax (*Picea pungens*)

E. R. Bukhanov^{1,a}, A. V. Shabanov^{1,b}, M. N. Krakhalev^{1,c}, M. N. Volochaev¹, Y. L. Gurevich²

¹Kirensky Institute of Physics Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the RAS»
Krasnoyarsk 660036, Russia

²Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the RAS»
Krasnoyarsk 660036, Russia

E-mail: ^ak26tony@ya.ru, ^balexch_syb@mail.ru, ^ckmn@iph.krasn.ru

The study of morphological and optical characteristics of the epicular wax layer of blue spruce (*Picea pungens*). The method of scanning electron microscopy revealed structural units — tubes with a diameter of 150–200 nm and a length of 3–5 microns. An iridescence effect from the wax layer domains has been detected. In the reflected light, the domains have a blue color, when observed in transmitted light acquire a pinkish tint. These optical characteristics are the main features of the photonic crystal structure. A numerical simulation of the transmission spectrum with the identified structural optical parameters was carried out using the transfer matrix method. The spectrum of the maximum fluorescence coincides with the defect mode of the calculated transmission spectrum.

PACS:

78.67.Pt textitKeywords: photonic crystal, defect mode, wax isolation, irisation, fluorescence.

Received 30 July 2019.

Сведения об авторах

1. Буханов Евгений Романович — магистр, мл. науч. сотрудник; e-mail: k26tony@ya.ru.
 2. Шабанов Александр Васильевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: alexch_syb@mail.ru.
 3. Михаил Николаевич Крахалев — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: kmn@iph.krasn.ru.
 4. Волочаев Михаил Николаевич — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; e-mail: volochaev91@mail.ru.
 5. Гуревич Юрий Леонидович — доктор физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; e-mail: btchem@mail.ru.
-