

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

Е.Р. Буханов¹, А.В. Шабанов¹, М.Н. Крахалев¹, М.Н. Волочаев¹, Ю.Л. Гуревич²

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

²ФИЦ КЦН СО РАН

K26tony@ya.ru

В настоящее время внимание многих исследователей привлечено к изучению влияния структуры зеленого листа растений на эффективность фотосинтеза. 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 [1], в которых и происходит фотосинтез. Структурными элементами являются слои с различными диэлектрическими проницаемостями [2]. Наличие в веществе периодичности с периодом близким к длине электромагнитной волны приводит к формированию разрешенных и запрещенных фотонных зон [3]. Предложенное Яблоновичем [4] название тонких структур получило широкое распространение, а уникальность их физических характеристик обусловила бурное развитие работ этого направления [5].

Используя метод трансфер матриц [6] авторам работ [7] удалось объяснить ряд особенностей в поведении оптических характеристик электромагнитного излучения, распространяющегося в хлоропластах.

Между тем влияние надклеточной структуры зеленого листа на физиологические характеристики является малоизученным. В основном из-за сложного внутреннего строения.

В настоящей работе представлены результаты исследования строения восковых нанотрубок, образующихся на поверхности иголки голубой ели.

Структурными элементами восков растений являются нанотрубки или нанодиски [8], параметры которых сравнимы с длиной волны света. Получение в чистом виде затруднительно. Изящный метод предложен в работе [9]. Иголочки хвойных растений выдерживали в водном растворе сахара, который проникал в полости между нанотрубками. При медленном обезвоживании происходит расслоение.

Нами использовался иной подход для селективного выделения нанотрубок от поверхности иголок голубой ели. Образцы были помещены в дистиллированную воду. При резком охлаждении ниже температуры замерзания воды, вследствие расширения льда происходило расслоение. После оттаивания оторванные частицы всплывали на поверхность где и были собраны на подложку для дальнейших исследований. В результате данного эксперимента на подложке были обнаружены как отдельно лежащие нанотрубки, так и спаянные в целые восковые пластины.

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). Изображение, полученное с поверхности хвои свидетельствует о трубчатой структуре воскового покрытия. По оценке внешний диаметр составляет 150-200 нм.

Оптическая микроскопия образцов проводилась на микроскопе Axio Imager.A1m (Zeiss) с использованием объектива 50x/0.8. Наблюдения проводились в проходящем и отраженном свете для неполяризованного и поляризованного света в геометрии скрещенных поляризаторов. В образце имеются частички размером от 1 до 4 мкм, сферической формы, которые в отраженном свете имеют голубой цвет. При наблюдении в проходящем свете частички приобретают розоватый оттенок. Наблюдение образцов в проходящем свете в геометрии скрещенных поляризаторов показало, что частички являются оптически анизотропными, при этом оптическая картина является осесимметричной с осью симметрии, проходящей через центр частички вдоль оптической оси микроскопа.

Результаты электронной и оптической микроскопии представлены на рисунке 1.

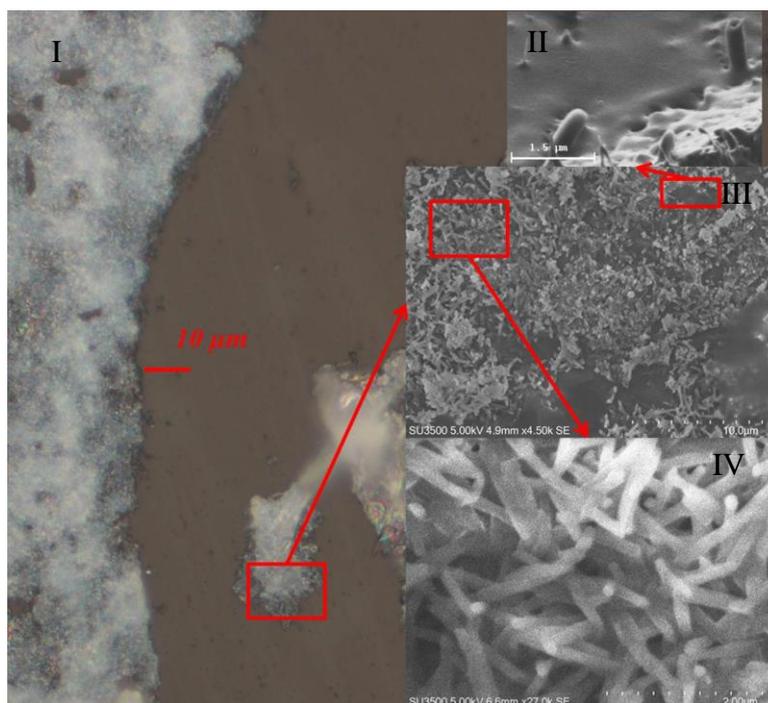


Рис. 1. I - Фотография с оптического микроскопа в отраженном свете. II, III, IV - фотографии полученные с помощью электронного микроскопа. Размерные шкалы приведены на рисунке.

Из рисунков видно эффект иризации в оптическом диапазоне, что является следствием фотоннокристаллической структуры. Период такой структуры определяется внешним диаметром 150-200 нм.

На основе полученных результатов проведены вычисления спектров пропускания для структур с низким контрастом (как в растительных структурах).

В работе 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 [10].

Математически была смоделирована биологическая структура воска. На рисунке 2 представлены графики спектра пропускания фотонного кристалла и фотонного кристалла с дефектом. Стоп-зона находится в области синего цвета, что соответствует результатам полученным с поляризационного микроскопа.

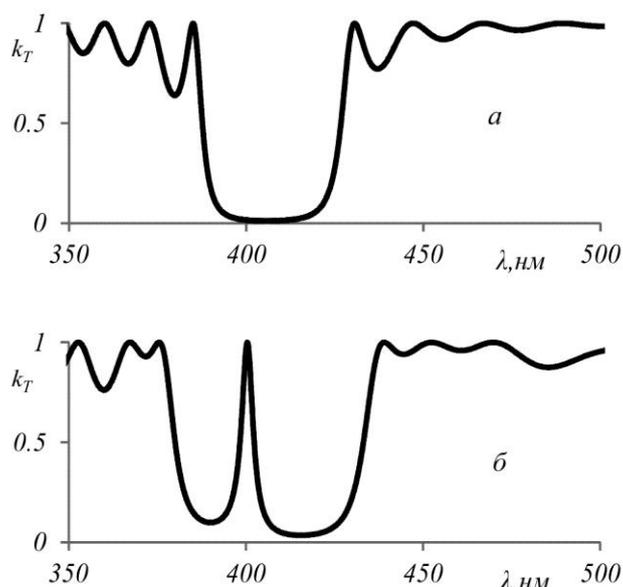


Рис. 2. Спектры пропускания для структуры воска (а) и структуры воска с дефектом (б).

В работе [12] 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 процентов. Также с помощью метода, предложенного данной статье, был создан раствор воска растворенного хлороформом и с него был получен спектр флюоресценции на флюориметре (Рисунок 3). Возбуждение образца с помощью света длиной волны 290 нм, дало сильную эмиссию на длине волны 400 нм. Также пик эмиссии попадает в стоп-зону с графика спектра пропускания и на дефектную моду в структуре с дефектом.

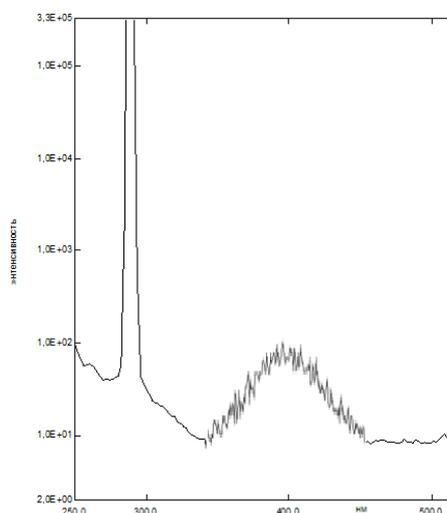


Рис. 3. Спектр интенсивности флюоресценции. Возбуждение происходило на длине волны 290 нм, ширина – 5нм. Линия флюоресценции 400 нм. Щель эмиссии – 10нм. Интервал данных 0.1 нм.

Проведено исследование по изоляции воскового слоя и изучения его оптических и морфологических характеристик, численное исследование ограниченных одномерных фотонных кристаллов с малым диэлектрическим контрастом, содержащих подрешетки с разным периодом. Восковой слой выполняет множество различных важнейших функций касающихся фотосинтеза. Он защищает растение от ультрафиолета поглощая

его и преобразовывая нужную длину волны тем самым повышая вероятность фотосинтеза в качестве выработки АТФ. Также восковой слой приходится растению в роли оптического фильтра отражая и пропуская определенные длины волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Jacobs et al. // *Nature plants*. 2016. V. 24. No. 16162. P. 1-6.
2. В.Ф. Шабанов, С.Я. Ветров, А.В. Шабанов // Новосибирск: Издательство СО РАН, 2005. 209 с.
3. В. П. Быков // *Квантовая электроника*. 1975. Т. 4. С. 861–866.
4. E. Yablonovitch // *Phys. Rev. Lett.* 1987. V. 58. Iss. 20. P. 2059–2062.
5. В. И. Белотелов, А. К. Звездин // М.: Бюро Квантум. 2006. 144с.
6. P. Yeh, A. Yariv, Ch.-Sh. Hong // *Journal of the Optical Society of America*. 1977. Vol. 67, Issue 4. P. 423-438.
7. А.В. Шабанов, М.А. Коршунов, Е.Р. Буханов // Самара: Компьютерная оптика, 2017. Т. 41, №5. С. 680 – 686.
8. W. Barthlott et al. // *Bot. J. Linnean Soc.* 1998. V. 126. P. 237–260.
9. Coward JL // *Flora*. 2007. V. 202. P. 462–470.
10. М. А. Коршунов, А. В. и др. // *ДАН*. 2018. Т. 478. № 3. С. 280–283.
11. G. D’Aguanno et al. // *PHYSICAL REVIEW E*. 2001. Vol. 64. P. 16609
12. R. H. Grant // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2003. V. 120. P. 127-139.