

О НЕКОТОРЫХ АСПЕКТАХ УСИЛЕНИЯ УГЛА ПОВОРОТА ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СРЕД

Агабекян В.Н.¹, Акопян А.С.², Седракян А.М.³

Email: Aghabekyan1150@scientifictext.ru

¹Агабекян Виген Нверович – заведующий лабораторией,
лаборатория «Модуляционные явления»;

²Акопян Александр Сергеевич – старший инженер,
лаборатория «Упорядоченные и неупорядоченные пористые среды»,
Институт прикладных проблем физики
Национальная Академия наук Армении;

³Седракян Армен Мхитарович – кандидат физико-математических наук, доцент,
кафедра физики,
Национальный политехнический университет,
г. Ереван, Республика Армения

Аннотация: предложен простой и эффективный метод измерения малых вращений плоскости поляризации электромагнитной волны при отражении света от усиливающей анизотропной среды. Показано, что данная методика дает возможность усиления незначительных изменений азимута поляризации падающей волны при условии сохранения линейной поляризации, без внесения эллиптичности поляризации в прошедшей через кристалл волне. Рассмотрена реальная схема эллипсометра с усилителем вращения плоскости поляризации, для которой проведены соответствующие численные расчеты.

Ключевые слова: гиротропия, эллипсометрия, оптически активная среда, угол вращения плоскости поляризации, усиливающая анизотропная среда, азимут угла поляризации, циркулярный дихроизм, азимутальная неэквивалентность, стабилизация азимута поляризации.

ON SOME ASPECTS OF THE INCREASE IN THE ANGLE OF ROTATION OF THE PLANE OF POLARIZATION OF ACTIVE MEDIA OPTICAL

Aghabekyan V.N.¹, Hakobyan A.S.², Sedrakyan A.M.³

¹Aghabekyan Vigen Nverovich – Head of Laboratory,
LABORATORY "MODULATION PHENOMENA";

²Hakobyan Aleksandr Sergeevich – Senior Engineer,
LABORATORY "ORDERED AND DISORDERED POROUS MEDIA",
INSTITUTE OF APPLIED PROBLEMS OF PHYSICS
NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF ARMENIA;

³Sedrakyan Armen Mkhitarovich – PhD in physico-mathematical science, Associate Professor,
DEPARTMENT OF PHYSICS,
NATIONAL POLYTECHNIC UNIVERSITY,
YEREVAN, REPUBLIC OF ARMENIA

Abstract: a simple and effective method to measure weak rotations of electromagnetic wave polarization planes when light is reflected from an anisotropic amplifying medium is proposed. It is shown that this technique makes possible to amplify very small changes of the azimuth of the polarization of the incident wave on condition that linear polarization don't change, without introducing the ellipticity of the polarization in the wave transmitted through the crystal. The real scheme of ellipsometer, for which the corresponding numerical calculations are given, with an amplifier for rotating the plane of polarization is considered.

Keywords: gyrotropy, ellipsometry, optically active medium, angle of rotation of the plane of polarization, amplifying anisotropic medium, azimuth of the polarization angle, circular dichroism, azimuthal nonequivalence, stabilization of polarization azimuth.

УДК 532.535

1. Введение

Развитие перспективных направлений научных исследований в биологии и медицине требует привлечения современных аналитических методов измерения характеристик кристаллов, химических и биологических объектов. В последние годы, благодаря своим уникальным способностям, большое значение приобретают оптические методы исследования сред, основанные на применении принципов оптики гиротропных сред, позволяющие получать ценную информацию о составе, структуре и внутренних взаимодействиях в исследуемом объекте.

Гиротропия представляет собой область оптики, основанная на исследовании теоретических и экспериментальных особенностей распространения света в гиротропных средах. Наиболее известными из этих особенностей являются естественная оптическая активность и циркулярный дихроизм - вращение плоскости поляризации. Гиротропия среды обусловлена нарушениями зеркальной симметрии (дисимметрией) составляющих ее элементов (отдельных частиц, молекул и пр.) и может быть как естественной, так и наведённой электрическими и магнитными полями, механическими деформациями, вращательным движением оптической среды, облучением среды светом и пр. Связанные с гиротропией линейные и нелинейные оптические явления имеют место в газах, жидкостях, а также в молекулярных, ионных, полупроводниковых и жидких кристаллах.

Гиротропия, в существенной мере, определяет поляризацию и показатели преломления электромагнитных волн в оптической среде. Благодаря этому, изменяя характеристики гиротропных сред, можно управлять свойствами электромагнитных волн, а измеряя их параметры, определять соответствующие характеристики гиротропных сред. Преобразование поляризации электромагнитной волны, при ее прохождении через кристаллы, дает большую информацию об их оптических параметрах, в частности, зависимость изменения азимута поляризации прошедшей через кристалл волны от азимута поляризации падающей волны, дает возможность изучения анизотропии, гиротропии и дихроизма кристалла.

Для исследования оптических свойств гиротропных сред используется эффект вращения плоскости поляризации плоской электромагнитной волны и циркулярный дихроизм, проходящего через данную среду светового пучка. Так, исследование вращения плоскости поляризации в инфракрасной области спектра дает важную информацию для понимания внутренней молекулярной структуры различных химических и биологических объектов.

Задача молекулярной теории оптической активности сред состоит в определении угла вращения плоскости поляризации и нахождении ее частотной зависимости, для той или иной модели гиротропной среды. Величина угла вращения плоскости поляризации зависит от ряда причин: природы оптически активного вещества, длины волны падающего света, толщины слоя, проходимого поляризованным лучом, концентрации раствора и пр. Одними из основных параметров, характеризующими угол вращения, являются азимуты вектора электрического смещения в падающем φ и отражённом Ψ пучках света, связанные соотношением $\text{tg } \varphi = k \cdot \text{tg } \Psi$. Величину k можно применять в качестве коэффициента усиления азимута для данной гиротропной среды. При изменении угла падения светового пучка на границу раздела двух прозрачных сред, величина k изменяется в довольно широких пределах, от единицы до нескольких десятков.

Метод эллисометрии, применяемый для определения характеристик гиротропной среды, основан на эффекте изменения формы поляризации света при отражении от поверхности раздела двух сред и заключается в облучении исследуемой поверхности поляризованным светом и измерении изменений эллипса поляризации луча света, в результате его отражения от поверхности. Физика данного метода заключается в изменении характеристик светового пучка, в результате его взаимодействия с исследуемой поверхностью, – изменении степени поляризации (эллиптичности) и вращении плоскости поляризации (ориентации эллипса). По этим изменениям определяют отражательные свойства поверхности, которые, однозначно, зависят от коэффициента преломления среды, наличия отражающих центров в приповерхностном слое или второй плоскости отражения.

Измеряемыми величинами в эллисометрии являются поляризационные характеристики световой волны, определяющие форму эллипса колебаний электрического вектора световой волны. Эллисометрическими параметрами являются разность фаз $\Delta\omega$ между компонентой E_s электрического вектора, перпендикулярного плоскости падения световой волны и компонентой E_p , параллельной этой плоскости, и величина тангенса $\text{tg } \Delta\omega$, значение которого равно отношению коэффициентов отражения в p - и s - плоскостях.

В поляриметрии возникает задача получения больших интенсивностей света на азимутах максимального усиления. При практических применениях важно, чтобы при соответствующих максимальных усилениях была, по возможности, большой также интенсивность света (в данном случае коэффициент отражения).

В последние годы, в области поляриметрических измерений был достигнут значительный прогресс, позволяющий повысить точность измерений сверхмалых углов вращения (поворотов) плоскости поляризации, что необходимо для экспериментального подтверждения ряда теоретически предсказанных эффектов, которые требуют измерения очень слабых поворотов плоскости поляризации.

Нелинейная зависимость между азимутами поляризации падающей и прошедшей волн дает возможность усиления (увеличения) величины изменения азимута поляризации падающей волны и его стабилизацию. Это позволяет повысить чувствительность поляриметрических измерений – измерения малых поворотов плоскости поляризации, путем их предварительного усиления, с помощью анизотропной пластинки. Величина усиления поворота плоскости поляризации зависит от многих

параметров: длины волны, толщины пластинки, значений тензора диэлектрической проницаемости пластинки. Вычисления, проведенные для обычных анизотропных сред, показывают, что усиление зависит также от эллиптичности падающего света: оно максимально, когда поляризация падающего света близка к линейной и обращается в ноль, когда поляризация падающего света приближается к круговой. В работе [1] показано, что, в общем случае, усиление поворота плоскости поляризации достигается или за счет уменьшения интенсивности света, или за счет увеличения эллиптичности поляризации. В работе [2] усиление обуславливается явлением азимутальной неэквивалентности при прохождении света через анизотропные среды. В данном случае, интенсивность прошедшего света обычно большая, но появляется эллиптичность поляризации, которая увеличивает шумы в измерениях и приводит к ухудшению разрешающей способности, измеряющего азимут устройства.

В работе [3] были исследованы особенности усиления в случае прохождения света через слой анизотропной усиливающей среды и показано, что в присутствии волны накачки, на азимутах максимального усиления поворота плоскости поляризации, можно получить значения разрешающей способности измерительного прибора, значительно превышающие единицу, практическое осуществление которого рассмотрено в [4].

2. Методика эксперимента

Для регистрации малых углов поворота плоскости поляризации светового луча в настоящей работе предлагается осуществлять усиление поворота плоскости поляризации и стабилизацию азимута поляризации за счет азимутальной неэквивалентности в оптически активной среде. При отражении света от таких сред неэквивалентность обуславливается различием коэффициентов отражения при прохождении волны с *p*- и *s*- поляризацией.

Ниже рассмотрены особенности осуществления усиления угла поворота плоскости поляризации и стабилизации азимута поляризации при отражении света от анизотропных сред, путем усиления слабого отраженного сигнала, при сохранении линейной поляризации первоначального светового луча.

Рассмотрим схему эллипсометра с усилителем поворота плоскости поляризации излучения (Рис.1), в основу которого положен принцип преобразования угла поворота оптически активным веществом и проведем расчеты для нее. Для сравнения, проведем соответствующие расчеты для того же самого эллипсометра в отсутствие усиливающей среды.

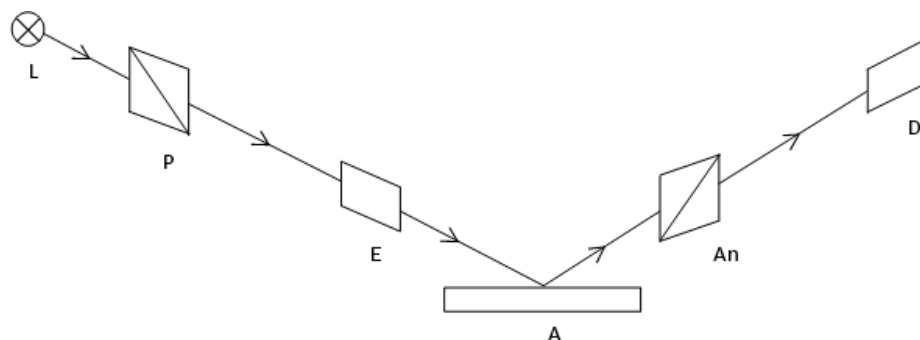


Рис. 1. Схема эллипсометра с усилением угла поворота плоскости поляризации излучения.

L - источник света, *P* - поляризатор, *E* - исследуемый объект, *A* - усиливающая среда (анизотропная пластинка), *An* - анализатор, *D* - детектор

Прохождение света через исследуемую среду и его отражение будем рассматривать при помощи матричного метода Джонса, согласно которому вектор-столбец выходящего пучка выражается через вектор-столбец входящего пучка и элементы эллипсометра, посредством уравнения

$$\vec{E}_{out} = T_A \cdot T_S \cdot T_{Amp} \cdot T_P \cdot \vec{E}_i.$$

Подставляя вместо операторов, соответствующие им величины, получаем в случае с усиливающей средой

$$\vec{E}_{out} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Analyser}(90^\circ) & \text{Sample} & \text{Amplifier} & \text{Polariser}(0^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_1 & \sin \theta_1 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_1 \cos \theta_1 & \sin^2 \theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-x} & 0 \\ 0 & e^{-y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_1 & \sin \theta_1 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_1 \cos \theta_1 & \sin^2 \theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

и, случае без усиления

$$\vec{E}_{out} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Analyser}(90^\circ) & \text{Sample} & \text{Polariser}(0^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_1 & \sin \theta_1 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_1 \cos \theta_1 & \sin^2 \theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_1 & \sin \theta_1 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_1 \cos \theta_1 & \sin^2 \theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $x = -i \frac{2\pi d(n'_x + in''_x)}{\lambda}$, $y = -i \frac{2\pi d(n'_y + in''_y)}{\lambda}$, α – угол поворота плоскости поляризации исследуемого вещества. Для интенсивностей выходящего сигнала, соответственно получаем

$$I \propto \vec{E}_{out}^2 = \left(1 + 2\cos\theta_2 \sin\theta_2 \left[\cos(\theta_2 - \theta_1 + \alpha) \exp\left(-\frac{4\pi d n_x''}{\lambda}\right) \right] \right), \quad (3)$$

$$I \propto \vec{E}_{out}^2 = \sin^2\alpha \quad (4)$$

3. Результаты и их обсуждение

Проведя соответствующие вычисления по формулам (3) и (4) для параметров $\alpha = 10^{-7}$ рад, $d = 500$ мкм, $\lambda = 0.6$ мкм, $n_x'' = -0.001$ получаем значения относительного изменения интенсивности ($\Delta I/I$): при наличии усиливающей среды $\Delta I/I = 3.53 \cdot 10^{-10}$ и $\Delta I/I = 10^{-14}$, при ее отсутствии. Такое значение изменения интенсивности выходящего сигнала ($3.53 \cdot 10^{-10}$) эквивалентно интенсивности излучения с углом вращения плоскости поляризации $\alpha = 1.88 \cdot 10^{-5}$ рад. без эффекта усиления, т.е. фактически, имеется усиление угла на два порядка, или соответствующее увеличение интенсивности света на четыре порядка. При соответствующем подборе параметров усиливающей среды возможно получение и более высоких значений усиления.

4. Заключение

Предложен простой и эффективный метод измерения малых углов поворота плоскости поляризации электромагнитной волны излучения. Исследованы особенности усиления угла поворота плоскости поляризации при отражении света от анизотропной усиливающей среды (анизотропной пластинки) с сохранением линейной поляризации. Рассмотрена практическая схема эллипсометра с усиливающей средой и приведены соответствующие оценки изменения интенсивности выходящего излучения, при наличии усиливающей среды и без нее. Показано, что применяемая методика позволяет усиливать интенсивность света на четыре и более порядка.

Предложенная методика обладает высокой чувствительностью измерения, значительным пространственным разрешением и универсальностью, и перспективна для применения :

- в кристаллографии, физхимии и биологии для получения информации о структуре, внутреннем поле, внутренних дефектах, а также дает возможность обнаружения ничтожных деформаций и смещений молекул, начиная с величин порядка $0,1 - 0,001$ А°;
- в медицине для ранней диагностики онкологических заболеваний, на основании определения частотно-резонансных характеристик внутренних органов, офтальмологии, различных заболеваний крови, а также определения подвижности бактерий и пр.

Список литературы / References

1. *Запасский В.С.* Методы высокочувствительных поляриметрических измерений. // Журнал прикладной спектроскопии, 1982. № 2 (37), С. 181-196.
2. *Свиташев К.К., Хасанов Т.* Измерения малых вращений плоскости поляризации.// Опт. и спектр., 1983. № 3 (54). С. 536-539 .
3. *Геворгян А.А., Седракян А.М., Хачатрян А.Ж.* Усиление поворота плоскости поляризации слоем холестерического жидкого кристалла. // Оптический журнал, 2008. № 2 (75), С.3-10.
4. Патент № АМ20060077, 06.05.2006. Метод усиления поворота плоскости поляризации электромагнитных волн и устройств.// *Геворгян А.А., Седракян А.М., Хачатрян А.Ж.*
5. *Геворгян А.А., Седракян А.М.* Усиление поворота плоскости поляризации усиливающей анизотропной пластинкой. // Известия НАН Армении. Физика, 2006. № 5 (41). С. 345-352 .
6. *Аззам Р., Башара Н.* Эллипсометрия и поляризованный свет. М. Мир, 1981. 584 с.
7. *Кизель В.А.* Индуцирование гиротропии как новый метод исследования в физике конденсированных сред. // Успехи физических наук, 1985. № 3 (147). С. 559-585.
8. *Беляков В. А., Дмитриенко В. Е.* Поляриза ционные явления в рентгеновской оптике. // Успехи физических наук, 1989. № 4 (158). С. 679-721.