مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية _ سلسلة العلوم الأساسية المجلد (28) العدد (1) 2006
Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research- Basic Science Series Vol. (28) No (1) 2006

تفاعل شعاع الليزر مع وسط مختلف المناحي

الدكتور أنور الدويري*

(قبل للنشر في 2006/2/5)

□ الملخّص □

الليزر باعتباره منبعاً قوياً للأشعة المترابطة، جعل من الممكن دراسة التفاعلات اللاخطية للأشعة الضوئية مع الذرات والجزئيات، مما نتج عن ذلك ظهور مجالات جديدة ومتعددة للاختبارات العلمية، مثل الضوء اللاخطي وغيره من مجالات العلوم الأخرى.

نقوم في هذا البحث بدراسة نظرية للظواهر اللاخطية العديدة التي تنتج عن تفاعل شعاع الليزر مع وسط مختلف المناحي خصوصاً الاستقطاب اللاخطي والظواهر الكهرضوئية اللاخطية الأخرى بالشكل التنسوري:

$$T, T_i, T_{ij}, T_{ijk}, T_{ijkl}, ..., T_{i_1}, ..., i_n$$

وحساب الاستقطاب الثابت (P_i)، الاستقطاب I التوافقية (P_i^{ω})، الاستقطاب II التوافقية $(P_i^{2\omega})$ والاستقطاب III التوافقية $(P_i^{3\omega})$.

* أستاذ مساعد في قسم الفيزياء كلية العلوم- جامعة تشرين- اللاذقية- سوريا.

مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية _ سلسلة العلوم الأساسية المجلد (28) العدد (1) 2006
Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research- Basic Science Series Vol. (28) No (1) 2006

Interaction of Laser Ray with an Anisotropic Center

Dr. Anwar Doiari*

(Accepted 5/2/2006)

□ ABSTRACT □

Laser, being a very powerful source of the intensity connected beams, has made it possible to study the nonlinear interactions of the beam rays with atoms and molecules. This gave rise to new and numerous fields for the scientific experiments, such as the nonlinear optics, besides other sciences.

In this study we discuss, theoretically, the numerous nonlinear phenomena which are produced the interaction of laser ray with a center anisotropic, especially the nonlinear polarization and other nonlinear $T, T_i, T_{ij}, T_{ijk}, T_{ijkl}, ..., T_{i_1}, ..., {}_{i_n}$ electro-optical effects in tensory form:

-I harmonic polarization (P_i) and calculate constant polarization

-$(P_i^{3\omega})$, and III harmonic polarization $(P_i^{2\omega})$, II harmonic polarization (P_i^{ω})

*Associate Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

لقد أصبح بالإمكان التحقق عملياً من عدة ظواهر فيزيائية جديدة بفضل الشدة العالية لشعاع الليزر، وهذا بعد أن كانت هذه الظواهر مجرد فرضيات نظرية بحتة. نذكر منها هنا ما يسمى بالظواهر اللاخطية.

إن معظم الظواهر الفيزيائية تقوم على التناسب الخطي، فمثلاً عندما نسلط شعاع ضوء عادي على بلورة ينعكس قسم من الشعاع، وأما القسم الآخر فيخترق البلورة. فإذا تضاعفت شدة الشعاع الوارد تتضاعف شدة الشعاع الذي يخترق البلورة، لذلك نقول عن هذه الظاهرة بأنها ظاهرة خطية. أما إذا اشتدت سعة الشعاع الوارد ملايين من المرات فإن شدة الشعاع الذي يخترق البلورة لا تتضاعف ملايين المرات، وهكذا فإن مبدأ الخطية يصبح باطلاً ونقول عن هذه الظاهرة إنها لا خطية. وتفسيرها يكمن في فهم عملية تنقل الشعاع الليزري داخل المادة المؤلفة من ذرات تحتوي كل واحدة منها على نواة والكترونات محيطة بها، حيث تشكل نواة الذرة مع الكتروناتها ثنائي أقطاب. فالشعاع، الذي هو موجة كهرطيسية، يتفاعل مع هذه الثنائيات ويحملها على الاهتزاز. وحسب قوانين الفيزياء الكلاسيكية، فإن هذه الثنائيات التي تهتز تكون مصدراً للأمواج الكهرطيسية فتؤثر بدورها على الثنائيات المجاورة لها داخل الجسم وهكذا دواليك إلى أن يخرج الشعاع الليزري من الجسم وتكون العلاقة بين شدة سعة الشعاع الوارد وشدة سعة الشعاع الذي يخترق البلورة لا خطية.

العازل اللاخطي بالشكل التنسوري:

يمكن التعبير عن استقطاب العازل الخطي P بالعلاقة:

$$P = a\,E \qquad (1)$$

عندما وفقط عندما يكون هذا العازل متماثل المناحي، أي عندما يملك الخواص نفسها في جميع الاتجاهات ويكون له في هذه الحالة نفس الاستقطاب a، حيث E الحقل الكهربائي المطبق على العازل الخطي، أما إذا كان العازل مختلف المناحي فإن العلاقة (1) تعطي الاستقطاب باتجاه واحد فقط من الاتجاهات الثلاثة المختارة المعروفة بالمحاور الأساسية.

بشكل عام في الأجسام المختلفة المناحي فإن كل مركبة للحقل E_j.

(حيث j = 1,2,3) تولد استقطاب في جميع الاتجاهات الثلاثة لمحاور الجملة. وكل مركبة من المركبات الثلاث للاستقطاب P_i (i =1,2,3) تتألف من ثلاثة حدود تحتوي جميع مركبات الحقل E_j.

لذلك فإن العلاقة (1) تستبدل بثلاث معادلات تحتوي على 3×3 قيم لـ a_{ij} وهي:

$$\begin{aligned} P_1 &= a_{11}E_1 + a_{12}E_2 + a_{13}E_3 \\ P_2 &= a_{21}E_1 + a_{22}E_2 + a_{23}E_3 \\ P_3 &= a_{31}E_1 + a_{32}E_2 + a_{33}E_3 \end{aligned} \qquad (2)$$

وتكتب العلاقات (2) بالشكل العام:

$$P_i = a_{ij}E_j \quad \text{و} \quad (i, j = 1,2,3) \qquad (3)$$

إذا كان الاستقطاب لاخطي فإن الاستقطاب يحقق العلاقة اللاخطية الآتية:

$$P=aE+bE^2+cE^3 \qquad (4)$$

حيث b و c عبارة عن الاستقطاب الماكروسكوبي ثنائي وثلاثي المرتبة.

وتكتب مركبات شعاع الاستقطاب من أجل العازل اللاخطي اعتماداً على العلاقة (4) بالشكل التنسوري العام:

$$P_i = a_{ij}\,E_j + b_{ijk}\,E_jE_k + c_{ijkl}E_jE_kE_l \qquad (5)$$

$$(i,j,k,l=1,2,3)$$ حيث

المقدار $\left[b_{ijk}\right]$ في المعادلات (5) يعني تنسور الاستقطاب التربيعي وهو عبارة عن تنسور ثلاثي المرتبة، عدد مركباته يساوي 3^3 .

أما المقدار $\left[c_{ijkl}\right]$ فيعني تنسور الاستقطاب التكعيبي رباعي المرتبة وعدد مركباته يساوي 3^4. يبيّن الجدول (1) المقادير التنسورية.

الجدول (1): المقادير التنسورية

عدد مركبات التنسور	شكل التنسور	اسم التنسور	مرتبة التنسور
$3^0=1$	T	تنسور المرتبة الصفرية $T^{(0)}$، أي مقدار سلمّي (عددي).	0
$3^1=3$	T_i	تنسور أحادي المرتبة $T^{(1)}$، أي مقدار متجه (شعاع).	1
$3^2=9$	T_{ij}	تنسور ثنائي المرتبة $T^{(2)}$،	2
$3^3=27$	T_{ijk}	تنسور ثلاثي المرتبة $T^{(3)}$،	.
$3^4=81$	T_{ijkl}	تنسور رباعي المرتبة $T^{(4)}$،	3
.....	.....	.....	.
.....	.....	.....	4
3^n	$T_{i_1},\ldots,_{i_n}$	تنسور نوني المرتبة $T^{(n)}$،	.
			.
			n

الظواهر الضوئية اللاخطية المتولدة عن حزمة ضوئية ليزرية عالية الطاقة:

إذا كان للوسط مركز تناظر فهذا يعني أن شدة الاستقطاب P تتغير من سلبية إلى إيجابية إذا ما انعكس اتجاه الحقل الكهربائي من السلبي إلى الإيجابي أما إذا وضع هذا الوسط في حقل كهربائي ثابت فإن الاستقطاب يفقده مركز التناظر.

لمعرفة الظواهر التي يمكن أن تحدث في بلورة معَّرضة بالوقت نفسه لتأثير حقل كهربائي ثابت $\overrightarrow{E^o}$ وحقل موجة كهرطيسية ناتجة عن حزمة ضوئية ليزرية عالية الاستطاعة، نستخدم العلاقة (5) التي فيها E_j و E_k و E_l تعني مركبات شعاع الحقل $\vec{E}$ الناتج عن تراكب الحقل الثابت $\overrightarrow{E^o}$ وحقل الموجة الضوئية $\overrightarrow{E^\omega}\cos\omega t$ الذي تواتره ω خلال الزمن t.

$$\vec{E}=\overrightarrow{E^{o}}+\overrightarrow{E^{\omega}}\cos\omega t \qquad (6)$$

إن حساب هذه النتيجة له أهمية فقط في الحالة عندما يكون في مجال التواتر من 0 إلى ω لا يوجد طيوف امتصاص وعندما يمكن إهمال التشتت الذي مصدره طيوف الامتصاص البعيدة.

إذا حسبنا مركبات الحقل $\vec{E}$ من العلاقة (6) بدلالة j و k و l نجد:

$$\begin{aligned} E_j &= E_j^o + E_j^\omega \cos\omega t \\ E_k &= E_k^o + E_k^\omega \cos\omega t \\ E_l &= E_l^o + E_l^\omega \cos\omega t \end{aligned} \qquad (7)$$

وعوضنا العلاقات (7) في العلاقة (5) ينتج:

$$\begin{aligned} P_i = {} & a_{ij}E_j^o + b_{ijk}E_j^oE_k^o + c_{ijkl}E_j^oE_k^oE_l^o + \frac{1}{2}b_{ijk}E_j^\omega E_k^\omega + \frac{3}{2}c_{ijkl}E_j^oE_k^\omega E_l^\omega + \\ & + \left(a_{ij}E_j^\omega + 2b_{ijk}E_j^oE_k^\omega + 3c_{ijkl}E_j^oE_k^oE_l^\omega + \frac{3}{4}c_{ijkl}E_j^\omega E_k^\omega E_l^\omega\right)\cos\omega t + \\ & + \left(\frac{1}{2}b_{ijk}E_j^\omega E_k^\omega + \frac{3}{2}c_{ijkl}E_j^oE_k^\omega E_l^\omega\right)\cos 2\omega t + \\ & + \left(\frac{1}{4}c_{ijkl}E_j^\omega E_k^\omega E_l^\omega\right)\cos 3\omega t + \end{aligned} \qquad (8)$$

والعلاقة (8) تكتب على النحو الآتي:

$$P_i = P_i^o + P_i^\omega\cos\omega t + P_i^{2\omega}\cos 2\omega t + P_i^{3\omega}\cos 3\omega t \qquad (9)$$

حيث P_i^o و P_i^ω و $P_i^{2\omega}$ و $P_i^{3\omega}$ تعني على التوالي المركبة i للاستقطاب الثابت والمركبة i لسعة الاستقطاب ذات التواتر $3\omega, 2\omega, \omega$:

وبمقارنة العلاقة (8) مع العلاقة (9) نجد أن:

$$P_i^o = a_{ij}E_j^o + b_{ijk}E_j^oE_k^o + c_{ijkl}E_j^oE_k^oE_l^o + \frac{1}{2}b_{ijk}E_j^\omega E_k^\omega + \frac{3}{2}c_{ijkl}E_j^oE_k^\omega E_l^\omega . \qquad (10)$$

$$P_i^\omega = a_{ij}E_j^\omega + 2b_{ijk}E_j^oE_k^\omega + 3c_{ijkl}E_j^oE_k^oE_l^\omega + \frac{3}{4}c_{ijkl}E_j^\omega E_k^\omega E_l^\omega . \qquad (11)$$

$$P_i^{2\omega} = \frac{1}{2}b_{ijk}E_j^\omega E_k^\omega + \frac{3}{2}c_{ijkl}E_j^oE_k^\omega E_l^\omega . \qquad (12)$$

$$P_i^{3\omega} = \frac{1}{4}c_{ijkl}E_j^\omega E_k^\omega E_l^\omega . \qquad (13)$$

عندما يحدث تشتت في الوسط فإن مركبات تنسورات الاستقطاب في جميع الحدود لمختلف المراتب تغير قيمتها بطرق مختلفة، تبعاً لتوترات شعاع الاستقطاب واشعة الحقل الكهربائي. نرمز للقيم الجديدة بأحرف كبيرة A و B و C وبالإضافة للأدلة السفلية $(i, j, k, l = 1,2,3)$ هناك أدلة علوية تعني توانرات أشعة الاستقطاب وأشعة الحقول المتشكلة في الحد المعطى، وعلى سبيل المثال في العلاقة (10) ستكون لدينا الحدود:

$$\frac{1}{2}B_{ijk}^{o\omega\omega}\,E_j^{\omega}\,E_k^{\omega} \quad \text{و} \quad B_{ijk}^{ooo}\,E_j^{o}\,E_k^{o}$$

وبالتالي تكتب العلاقات (10) و (11) و(12) و(13) على النحو الآتي:

$$P_i^o = A_{ij}^{oo}\,E_j^o + B_{ijk}^{ooo}\,E_j^o\,E_k^o + C_{ijkl}^{oooo}\,E_j^o\,E_k^o\,E_l^o + \frac{1}{2}B_{ijk}^{o\omega\omega}\,E_j^{\omega}\,E_k^{\omega} + \frac{3}{2}\,C_{ijkl}^{oo\omega\omega}\,E_j^o\,E_k^{\omega}\,E_l^{\omega}. \quad \textbf{(14)}$$

$$P_i^{\omega} = A_{ij}^{\omega\omega}\,E_j^{\omega} + 2B_{ijk}^{\omega oo}\,E_j^o\,E_k^{\omega} + 3C_{ijkl}^{\omega ooo}\,E_j^o\,E_k^o\,E_l^{\omega} + \frac{3}{4}\,C_{ijkl}^{\omega\omega\omega\omega}\,E_j^{\omega}\,E_k^{\omega}\,E_l^{\omega}. \quad \textbf{(15)}$$

$$P_i^{2\omega} = \frac{1}{2}B_{ijk}^{2\omega\omega\omega}\,E_j^{\omega}\,E_k^{\omega} + \frac{3}{2}\,C_{ijkl}^{2\omega\,o\omega\omega}\,E_j^o\,E_k^{\omega}\,E_l^{\omega}. \quad \textbf{(16)}$$

$$P_i^{3\omega} = \frac{1}{4}C_{ijkl}^{3\omega\omega\omega\omega}\,E_j^{\omega}\,E_k^{\omega}\,E_l^{\omega}. \quad \textbf{(17)}$$

النتائج والمناقشة:

إن كل حد من حدود العلاقات (14) و (15) و (16) و (17) يمثل ظاهرة خطية أو لاخطية كما سنوضح في الجدول (2).

يحوي الجدول (1) ظاهرتين خطيتين، استقطاب عازلي (1) وضوئي (6) وعشر ظواهر لاخطية ، من بين هذه الظواهر الأخيرة يوجد ظاهرتان كهربائيتان (3,2)، ظاهرتان ضوئية- كهربائية (5,4)، وثلاث ظواهر كهربائية-ضوئية (11,8,7) وأخيراً ثلاث ظواهر ضوئية تماماً (12,10,9). ظاهرتان من بين الظواهر السابقة لم تلاحظ بشكل مباشر حتى الآن وهما (9,5) :

5- تغير النفوذية العازلية للجسم الصلب تحت تأثير حزمة ضوئية ليزرية ذات شدة عالية.

9- تغير قرينة انكسار الجسم الصلب تحت تأثير حزمة ضوئية ليزرية عالية الاستطاعة. يجب أن تحدث هاتان الظاهرتان في السوائل أيضاً كنتيجة للاتجاه الضوئي للجزيئات، وهو عبارة عن اتجاه للجزيئات المختلفة المناحي المتولد بالشعاع الكهربائي للموجة الضوئية [14,15].

إن الظاهرتين 11 و12 أيضاً عبارة عن توليد الثنائية التوافقية المحرضة بحقل كهربائي وتوليد الثلاثية التوافقية التي يجب أن تحدث في السوائل [16].

إن تشوه الغمامة الالكترونية للذرات أو الجزيئات في الحقل الضوئي المعروف بـ B_m^{NL} يتعلق بالخواص اللاخطية للذرات أو الجزيئات المحددة بواسطة تنسور الاستقطاب C_{ijkl}، وعند حساب هذا التنسور نستطيع قياس المقدار B_m^{NL} ومعرفة الوسط المدروس والمزيد عن خواصه الفيزيائية والكيميائية .

الجدول (2): الظواهر الخطية والظواهر اللاخطية الناتجة عن تفاعل شعاع الليزر مع وسط مختلف المناحي .

الظاهرة	الحدود التفصيلية	الاستقطاب
1- الاستقطاب العازلي الخطي. A_{ij}^{oo} عبارة عن تنسور السماحية العازلية المطلقة. تجريبياً يمكن حساب [1] مركبات تنسور النفوذية العازلية المطلقة المحدد بالعلاقة $D_i=\varepsilon_{ij}^{\circ} E_j$ حيث $\varepsilon_{ij}^{\circ}=\varepsilon_o \delta_{ij}+A_{ij}^{oo}$ و ε_o النفوذية المطلقة للخلاء، $\delta_{ij}=1$ من أجل $i=j$ و $\delta_{ij}=0$ عندما $i\neq j$.	$A^{oo} E_j^o +$	$P_i^o =$ (ثابت)
2- الاستقطاب العازلي التربيعي. يوجد فقط في الأوساط البلورية التي ليس لها مركز تناظر وترتبط النفوذية العازلية خطياً مع الحقل.	$+B_{ijk}^{ooo} E_j^o E_k^o +$	
3- الاستقطاب العازلي التكعيبي، يلاحظ بشكل إشباع عازلي في مواد متبلورة ذات استقطاب كهربائي عفوي عند حقول عالية. وينتج عن حقول عالية(من مرتبة 10- 100kv/cm) ويحدث في الأجسام المتماثلة المناحي [2] وفي السوائل [3] بشكل إشباع عازلي عادي، أي سالب أو موجب.	$+C_{ijkl}^{oooo} E_j^o E_k^o E_l^o +$	
4- استقطاب عازلي ثابت، يترافق بتوليد الثنائية التوافقية ويحدث عندما لا يوجد مركز تناظر. حيث تمّ اكتشاف هذه الظاهرة من قبل فرانكين وشركائه [4] في عام 1962.	$+\frac{1}{2}B_{ijk}^{o\omega\omega} E_j^{\omega} E_k^{\omega} +$	
5- تغير الاستقطاب العازلي، المتشكل عند توليد الثلاثية التوافقية بوجود حقل ثابت [5,6].	$+\frac{3}{2}C_{ijkl}^{oo\omega\omega} E_j^o E_k^{\omega} E_l^{\omega}$	
6- الاستقطاب الضوئي الخطي. يحدث تجريبياً كقرنية انكسار ثابتة، لا تتعلق بسعة حقل الموجة الضوئية.	$A_{ij}^{\omega\omega} E_j^{\omega} +$	$P_i^{\omega} =$ I التوافقية (الأساسية)
7- الظاهرة الكهرضوئية الخطية، تخضع لتغير قرنية الانكسار المتناسبة مع الحقل الكهربائي المطبق الثابت أو المتغير (شبه- ثابت).	$+2B_{ijk}^{\omega o\omega} E_j^o E_k^{\omega} +$	
8- الظاهرة الكهرضوئية التربيعية (ظاهرة كير Kerr)، لوحظت في البلورات والسوائل المتماثلة المناحي [7]، وفي السوائل كانكسار مضاعف في الحقل الكهربائي.	$+3C_{ijkl}^{\omega ooo} E_j^o E_k^o E_l^{\omega} +$	
9- تغير قرنية انكسار الجسم الصلب تحت تأثير الحقل الكهربائي للموجة الضوئية[8,9,10].	$+\frac{3}{4}C_{ijkl}^{\omega\omega\omega\omega} E_j^{\omega} E_k^{\omega} E_l^{\omega} +$	

الظاهرة	الحدود التفصيلية	الاستقطاب
10- توليد II التوافقية في البلورات التي ليس لها مركز تناظر [11]. 11- توليد الثنائية التوافقية المحرضة بواسطة حقل كهربائي [12].	$\frac{1}{2}B_{ijkl}^{2\omega\,\omega\,\omega}\;E_j^{\omega}\,E_k^{\omega}$ $+3C_{ijkl}^{2\,\omega o\,\omega\omega}\;E_j^{0}\,E_k^{\omega}\,E_l^{\omega}$	$P_i^{2\omega}=$ II التوافقية
12- توليد الثلاثية التوافقية [13].	$\frac{1}{4}C_{ijkl}^{3\omega\omega\omega\omega}\;E_j^{\omega}\,E_k^{\omega}\,E_l^{\omega}$	$P_i^{3\omega}=$ IIIالتوافقية

إن النتائج نفسها التي أوضحناها بالعلاقة (9) والعلاقات المحتواة في الجدول (1) يمكن أن نحصل عليها بطريقة أكثر عمومية، أي إذا أخذنا من نقطة الانطلاق علاقة طاقة الوسط العازل الموجود في حقل كهربائي ثابت $\overrightarrow{E^o}$ وحقل متغير ذي تواتر زاوي ω هذه الطاقة عبارة عن تابع ذي ست مركبات لكلا الحقلين الذي يمكن نشره وفق سلسلة تايلور حول قيمة المركبات الصفرية. وباشتقاق الطاقة بالنسبة لمركبات الحقل نحصل على مركبات الاستقطاب الموافقة.

بطريقة مشابهة يمكن حساب مركبات الاستقطاب باستخدام الميكانيك الكوانتي، مع العلم أنه في هذه الطريقة تكون عبارة الطاقة أي الهاميلتون تابع لعبارات متغيرة ليست مقادير فيزيائية، بل عبارة عن مؤثرات مناسبة تحدد هذه المقادير.

المراجع:

[1]– J.F. nye, physical properties of crystals, clarendon press, oxford 1957;tlumaczenie polskie: fizyczne wlasnosci krysztalow, PWN, warszawa 1962, p. 297.

[2]– A.piekara, poc. Of the XI colloque ampere, eindhoven 1999.

[3]– A. Piekara, b. Piekara, C. R. Ac. Sc. (Paris), 203, 852 (2003); a.piekara, Acta Phys. Pol. 18, 361 (2004).

[4]– M. Bass, P. A. Franker, J. F. Ward, G. Weinreich, Phys. Rev. Letters 9, 446 (1962).

[5]– Z. Blaszczak, Optics, Commun, 58, 439 (2002).

[6]– S. Kielich. Prop. Phys. Polon. A 68, 629 (2000).

[7]– F. Kaczmarek;, Wstep do fizyki laserow (1990).

[8]– A. D. Buckingham, Proc. Phys. Soc. B 69, 344 (1989).

[9]– E. Garmire, R. Y. Chiao, C. H. Townes, Phys. Rev. Letters, 16, 347 (1999).

[10]– P. L. Kelley. Phys. Rev. Letters, 15, 1005 (1998).

[11]– F. Kaczmare, Second rochester Conference and Quautum Optics, Abstracts, 2001.

[12]– Z. Blaszczak, P. Gauden, Europhysics Conference. Abstracts, 13D, part ii, P2. 59, dresden (2003).

[13]– S. Kielech, Podstawy optyki nieliniowej, Uniw. im. A. Mickiewicza, poznan: cz. I- 1999, cz. Ii- 2002.

[14]– A. K. Levin, Lasers, New York 1989.

[15]– N. Bloembergen, Nonlinear Optics, New York 1995.

[16]– A. Piekara, S. Kielich, Electronique Quantque (C. R. de la 3-e Conference Internationale, Paris 1996), Dunod, Paris 1994, P. 1601.