

دراسة مقارنة لتأثير المجال المغناطيسي على المتأثرية الكهربية غير الخطية للذرات ذات الأربع مستويات عند تفاعلها مع اشعة الليزر متساوية و مختلفة التردد

* سعد محمد محمد ابوزرية ، نجاح احمد الزعلوك²

قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة مصراتة، مصراتة، ليبيا

قسم الفيزياء، كلية التربية، مصراتة، ليبيا

Email: Soud.b@sci.misuratau.edu.ly

تاريخ الاستلام: 20.6.2021

تاريخ القبول: 5.7.2021

تاريخ النشر: 1.8.2021

المخلص Abstract:

تم استنتاج علاقة لحساب المتأثرية الكهربية غير الخطية لذرات الأربع مستويات من الطاقة عند تفاعلها مع ثلاثة اشعة ليزر في وجود مجال مغناطيسي ، وذلك بدراسة تفاعل اشعة الليزر مع الذرة للنظام الذري ذو الأربع مستويات ذرية من الطاقة ، ومن تم اجراء مقارنة بين تأثير تطبيق المجال المغناطيسي على المتأثرية الكهربية غير الخطية في حال كون اشعة الليزر لها نفس التردد او اذ كانت ذات تردد مختلف . وايضا تأثير زيادة الفرق بين تردد اشعة الليزر المسلطة على المتأثرية غير خطية للذرات.

الكلمات المفتاحية: البصريات غير الخطية ، المتأثرية غير الخطية ، اشعة الليزر ، المجال المغناطيسي ، الاستقطابية الكهربية ، الذرات ذات الاربع مستويات ..

المقدمة Introduction

تعتبر البصريات غير الخطية مفيدة للغاية اذ انها تلعب دورا أساسيا في العديد من الأجهزة البصرية مثل (محولات التردد والخلاطات ، الطيف غير الخطي ، ومصادر الإضاءة الجديدة) [1] ، وقد تم ابتكار تقنيات لاستغلال هذه الظاهرة بطريقة فعالة [2-4]. وتظهر أهمية الخصائص البصرية عند تفاعل الضوء مع المادة من خلال ظاهرة تسمى "الامتصاص". فعندما تتيح الطاقة الممتصة من الفوتونات الانتقال من الحالة المتهيجة الى الحالة الارضية يؤدي الى مانسميه "الامتصاص الخطي" ، وقد يحدث وأن تكون هناك زيادة في التهيج بسبب شدة الفوتونات الواردة يحدث مايسمى بالامتصاص اللاخطي [5].

وتعرف المواد غير الخطية بانها المواد التي ترتبط الكتروناتها بنوابض قصيرة فاذا كانت شدة المجال الكهربائي كافية بحيث تسحب الالكترونات بعيدا حتى تصل الى نهاية النابض . وبذلك تكون علاقة الطاقة المخزونة غير خطية مع المسار التي سحب النابض اليها ولا تعود الالكترونات الى امكنتها الطبيعية ، وبالتالي تنذب بترددات غير تردد الضوء الساقط عليها ، وتشتع هذه الالكترونات الضوء بتردد مختلف عن تردد الضوء الساقط عليها [6]. ومن الجدير بالذكر أنه فقط 10% من البلورات في الطبيعة لها معاملات غير خطية [4].

منذ أن عرفت الاستجابة غير الخطية باكتشاف الليزر سنة 1960م أصبحت البصريات غير الخطية مركزا لاهتمام الباحث والدارسين لما لها من دورا أساسيا في العديد من الأجهزة البصرية وتمكنوا من ابتكار العديد من التقنيات للأستفادة من هذه الظاهرة . حيث قاموا بدراسة كل ما يتعلق بالبصريات غير الخطية من أسباب حدوثها وأبعادها الفيزيائية وأهتموا أيضا بدراسة التفاعل المشترك بين اشعة الليزر والمواد بأنواعها ومستوياتها المختلفة وكان لليزر ذي الطاقة العالية أهمية كبيرة في العديد من التطبيقات الصناعية والعلمية [7] مثل معالجة الليزر [8,9] وتوليد جزينات عالية الطاقة [10] وأهتم العلماء بدراسة الظواهر الفيزيائية الناتجة عن تلك التفاعلات ومن بين هذه الظواهر (المتأثرية الكهربية). حيث ركزت الجهود بداية على دراسة العلاقة بين المتأثرية الكهربية وكل من المجالين الكهربي والمغناطيسي ، وايضا العلاقة بين المتأثرية الكهربية والتردد وطاقة الفوتون ، اما بالنسبة لدراسة تأثير (المجال المغناطيسي) على المتأثرية الكهربية فكانت هناك دراسة سنة 2004م بينت ان هناك اعتمادية للمتأثرية الكهربية الساكنة على المجال المغناطيسي [11]، وفي سنة 2006 درست علاقة اللف المغزلي للمتأثرية مع المجال المغناطيسي المطبق [12] ، ايضا في سنة 2013م تمت دراسة العلاقة بين المتأثرية الكهربية الخطية والمجال المغناطيسي ووجد ان المتأثرية الكهربية تعتمد على شدة

المجال المغناطيسي. وأنه أيضا من خلال هذه الاعتمادية يمكن التحكم في سرعة الضوء المار خلال الوسط (فعندما يكون المجال المغناطيسي المسلط قوي جدا فان سرعة الضوء خلال الوسط تكون أعلى مايمكن) [13].

أما في هذا البحث تم استنتاج معادلات الحركة للذرات لنتمكن من دراسة تأثير تسليط المجال المغناطيسي على المتأثرية الكهربية غير الخطية (بجزئها الحقيقي والتخيلي) -عند تفاعلها مع اشعة الليزر- وذلك بإضافة الحدود غير الخطية من الطاقة (الذي لم تتناوله الدراسات السابقة حسب علمنا) ،

تلاحظ الصفة غير الخطية عند الشدات العالية للضوء أو بوضع الشعاع الضوئي في حالة رنين أو شبه رنين مع بعض أنماط الترددات الطبيعية للمادة .

حيث يعمل الشعاع الضوئي ذي الشدة العالية وعند ترددات معينة لتتحول العلاقة بين القوة المؤثرة على المادة والاستجابة من قبل المادة من علاقة خطية إلى علاقة غير خطية، وتبرز الخواص البصرية غير الخطية مثل المتأثرية الكهربية غير الخطية . تم استخدام معادلات الحركة للذرات التي تم استنتاجها لدراسة تأثير تسليط المجال المغناطيسي على المتأثرية الكهربية غير الخطية (بجزئها الحقيقي والتخيلي) -عند تفاعلها مع اشعة الليزر- (الذي لم تتناوله الدراسات السابقة حسب علمنا) ، وايضا تأثير زيادة الفرق بين ترددي شعاعي الليزر المسلط على الذرات.

حيث تم التوصل للمتأثرية الكهربية غير الخطية عن طريق تفاعل اشعة من الليزر مع المادة في حالتين: الأولى بتسليط اشعة الليزر متساوية الشدة والتردد، اما الثانية فكانت بتسليطها متساوية الشدة ومختلفة التردد . والنظام الذري الذي تمت دراسته هو النظام الذري ذو الأربع مستويات من الطاقة : في هذه الحالة تم تسليط ثلاث اشعة ليزر على النظام تحت الدراسة وتمت الدراسة بحالتين منفصلتين كانت ترددات الأشعة متساوية في مرة وكانت مختلفة في المرة الأخرى.

الدراسة الرياضية

أولاً: الدراسة بأشعة الليزر متساوية الشدة والتردد

نستخدم في هذه الحالة ثلاث اشعة ليزر متساوية الشدة $(I_1 = I_2 = I_3 = I)$ والتردد $(\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega)$ للتفاعل مع نظام ذري مكون من ذرتين كتلتها $(M_1), (M_2)$ مع وجود مجال مغناطيسي فتكون معادلتا الحركة للنظام كما في المعادلتين (2) ، (3). بإيجاد الحل الخاص لهاتين المعادلتين والتعويض بهما في معادلتا الحركة والمعالجة الرياضية المناسبة تم الحصول على الاستقطابية الكهربية غير الخطية عند تسليط مجال مغناطيسي والتي منها أمكن التوصل

$$n_0 e^2 E = \left(\frac{e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}}{[C[2 - e^{ika} - e^{3ika}][e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}] - M_1[\omega_1^2 e^{i\omega_1 t} + \omega_2^2 e^{i\omega_2 t} + \omega_3^2 e^{i\omega_3 t}]] - Be(i)[\omega_1 e^{i\omega_1 t} + \omega_2 e^{i\omega_2 t} + \omega_3 e^{i\omega_3 t}]} \right) \frac{e^{3ika} [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}]}{[C[2 - e^{ika} - e^{3ika}][e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}] - M_1[\omega_1^2 e^{i\omega_1 t} + \omega_2^2 e^{i\omega_2 t} + \omega_3^2 e^{i\omega_3 t}]] - Be(i)[\omega_1 e^{i\omega_1 t} + \omega_2 e^{i\omega_2 t} + \omega_3 e^{i\omega_3 t}]} \quad (12)$$

المعادلة (12) تمثل علاقة تربط بين الاستقطابية الكهربائية والمجال الكهربائي من جهة وبين الاستقطابية الكهربائية والمجال المغناطيسي من جهة أخرى. وإذا استخدمنا:-

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= C[2 - e^{ika} - e^{3ika}][e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}] - M_1[\omega_1^2 e^{i\omega_1 t} + \omega_2^2 e^{i\omega_2 t} + \omega_3^2 e^{i\omega_3 t}] \\ \beta_1 &= Be[\omega_1 e^{i\omega_1 t} + \omega_2 e^{i\omega_2 t} + \omega_3 e^{i\omega_3 t}] \\ \alpha_2 &= C[2 - e^{ika} - e^{3ika}][e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}] - M_2[\omega_1^2 e^{i\omega_1 t} + \omega_2^2 e^{i\omega_2 t} + \omega_3^2 e^{i\omega_3 t}] \\ \beta_2 &= Be[\omega_1 e^{i\omega_1 t} + \omega_2 e^{i\omega_2 t} + \omega_3 e^{i\omega_3 t}] = \beta_1 \end{aligned} \quad (13)$$

فإن

$$P = n_0 e^2 E \left(\frac{\alpha_1 [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}]}{[\alpha_1 + \beta_1]} - \frac{\alpha_2 [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}] e^{3ika}}{[\alpha_1 + \beta_1]} \right) + \left(\frac{\beta_1 [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}]}{[\alpha_1 + \beta_1]} - \frac{\beta_2 [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}] e^{3ika}}{[\alpha_1 + \beta_1]} \right) \quad (14)$$

وبما أن المتأثرية الكهربائية غير الخطية (χ) تعطى بالعلاقة [15]

$$P = \chi E \quad (15)$$

حيث:

$$X = X_1 + iX_2 \quad (16)$$

حيث X_1 يمثل الجزء الحقيقي للمتأثرية الكهربائية غير الخطية، X_2 يمثل الجزء التخيلي للمتأثرية الكهربائية غير الخطية.

$$\begin{aligned} X_1 &= n_0 e^2 \frac{\alpha_1 [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}]}{[\alpha_1 + \beta_1]} - n_0 e^2 \left(\frac{\alpha_2 [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}]}{[\alpha_1 + \beta_1]} \right) \quad (17) \\ X_2 &= \left(\frac{\beta_1 [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}] n_0 e^2}{[\alpha_1 + \beta_1]} - \left(\frac{\beta_2 [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}] e^{3ika} n_0 e^2}{[\alpha_1 + \beta_1]} \right) \right) \quad (17) \end{aligned}$$

ثانياً: الدراسة بأشعة الليزر مختلفة التردد

في هذه الحالة سيكون لأشعة الليزر ترددات مختلفة لهذا $\omega_1 \neq \omega_2 \neq \omega_3$ والمجال الكهربائي لأشعة الليزر وكما في المعادلة (1) سنأخذ الشكل: $(E_i = E_0 e^{i\omega_i t})$, $i = (1,2,3)$ مع مجال مغناطيسي كثافته (B) على بلورة ذات ذرتين كتلتها (M_1) ، (M_2) . فإن: معادلتا الحركة لهاتين الذرتين تكون على الصورة:-

$$M_1 \ddot{U}_{n-1} = -c[2U_{n-1} - Un - U_{n+2}] + eE_1 + eE_2 + eE_3 + Be\dot{U}_{n-1} \quad (18)$$

$$M_2 \ddot{U}_{n+2} = -C[2U_{n+2} - U_{n-1} - U_{n+1}] - eE_1 + eE_2 + eE_3 - eE_3 + Be\dot{U}_{n+2} \quad (19)$$

حيث أن:-

U_{n+1}, U_{n-1} تمثلان ازاحة الكتلة M_1 على جانبي موضع الاتزان

(U_{n+2}, U_n) يمثلان ازاحة الكتلة M_2 على جانبي موضع الاتزان.

علاقة تحكم المتأثرية الكهربائية غير الخطية وعلاقتها بكل من المجالين الكهربائي والمغناطيسي. فإذا كان المجال الكهربائي لأشعة الليزر يمكن كتابته وفق المعادلتين:-

$$E_i = E_0 e^{i\omega_i t} \quad (1)$$

حيث:

$$i = (1,2,3)$$

فإن معادلات الحركة تكون بالشكل:

$$M_1 \ddot{U}_{n-1} = -c[2U_{n-1} - Un - U_{n+2}] + eE_1 + eE_2 + eE_3 + Be\dot{U}_{n-1} \quad (2)$$

$$M_2 \ddot{U}_{n+2} = -C[2U_{n+2} - U_{n-1} - U_{n+1}] - eE_1 + eE_2 + eE_2 + eE_3 - eE_3 + Be\dot{U}_{n+2} \quad (3)$$

حيث أن:-

U_{n+1}, U_{n-1} تمثلان ازاحة الكتلة M_1 على جانبي موضع الاتزان

(U_{n+2}, U_n) يمثلان ازاحة الكتلة M_2 على جانبي موضع الاتزان. وكذلك:-

$$\ddot{U}_{n-1} = d/dt (d/dt (U_{n-1})). \quad (4)$$

$$\ddot{U}_{n+2} = d/dt (d/dt (U_{n+2})). \quad (5)$$

حل المعادلتين (2)، (3) يمكن فرضه على الصورة:-

$$U_{n-1} = U_{0nB} e^{ik(n-1)a} [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}] \quad (6)$$

$$U_{n+2} = U_{0n} e^{ik(n+2)a} [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}] \quad (7)$$

بحل المعادلتين (2)، (3) نتحصل على:

$$U_{0n} e^{ik(na)} =$$

$$\frac{E_0 [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}]}{C[e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}][2 - e^{ika} - e^{3ika}] - e^{ika} M_1 [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}] - Be(i)[\omega_1 e^{i\omega_1 t} + \omega_2 e^{i\omega_2 t} + \omega_3 e^{i\omega_3 t}]} \quad (8)$$

وبالتعويض عن المعادلة (8) في المعادلة (6)

فإن:

$$U_{n-1} = \frac{eE [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}]}{[C[2 - e^{ika} - e^{3ika}][e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}] - M_1[\omega_1^2 e^{i\omega_1 t} + \omega_2^2 e^{i\omega_2 t} + \omega_3^2 e^{i\omega_3 t}]] - Be(i)[\omega_1 e^{i\omega_1 t} + \omega_2 e^{i\omega_2 t} + \omega_3 e^{i\omega_3 t}]} \quad (9)$$

وبالتعويض عن المعادلة (8) في المعادلة (7):

فإن:

$$U_{n+2} = \frac{eE e^{3ika} [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}]}{C[2 - e^{ika} - e^{3ika}][e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}] - M_2[\omega_1^2 e^{i\omega_1 t} + \omega_2^2 e^{i\omega_2 t} + \omega_3^2 e^{i\omega_3 t}]] - Be(i)[\omega_1 e^{i\omega_1 t} + \omega_2 e^{i\omega_2 t} + \omega_3 e^{i\omega_3 t}]} \quad (10)$$

وبما أن الاستقطابية الكهربائية تعطى بالعلاقة [14]

$$P = n_0 e (U_{n-1} - U_{n+2}) \quad (11)$$

فإن:

$$P =$$

والتي منها يمكن الحصول على المتأثرية الكهربائية غير الخطية

$$X = n_0 e^2 \left(\frac{\alpha_1 [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}]}{[\alpha_1 + \beta_1]} \right) - n_0 e^2 \left(\frac{\alpha_2 [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}] e^{3ika}}{[\alpha_2 + \beta_2]} \right) + n_0 e^2 \left(\frac{i\beta_1 [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}]}{[\alpha_1 + \beta_1]} \right) - n_0 e^2 \left(\frac{i\beta_2 [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}] e^{3ika}}{[\alpha_2 + \beta_2]} \right) \quad (28)$$

والتي يمكننا كتابتها على الصورة:-

$$X = X_1 + iX_2 \quad (29)$$

حيث X_1 يمثل الجزء الحقيقي للمتأثرية الكهربائية غير الخطية، X_2 يمثل الجزء التخيلي للمتأثرية الكهربائية غير الخطية.

بالتالي:-

$$X_1 = n_0 e^2 \left(\frac{\alpha_1 [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}]}{[\alpha_1 + \beta_1]} \right) - n_0 e^2 \left(\frac{\alpha_2 [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}] e^{3ika}}{[\alpha_2 + \beta_2]} \right) \quad (30)$$

$$X_2 = \left(\frac{\beta_1 [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}] n_0 e^2}{[\alpha_1 + \beta_1]} \right) - \left(\frac{\beta_2 [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}] e^{3ika} n_0 e^2}{[\alpha_2 + \beta_2]} \right) \quad (30)$$

المعادلة (30أ) تمثل الجزء الحقيقي للمتأثرية الكهربائية غير الخطية، المعادلة (30ب) تمثل الجزء التخيلي للمتأثرية الكهربائية غير الخطية.

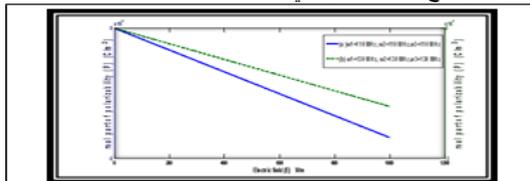
ومن المعادلتين (26)، (30أ)، (30ب) يتضح لنا اعتمادية المتأثرية الكهربائية غير الخطية على المجال المغناطيسي.

الحسابات والنتائج

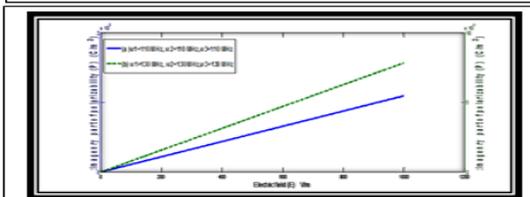
أولاً: الدراسة بأشعة الليزر متساوية الشدة والتردد

أ- تأثير المجال الكهربائي على الاستقطابية الكهربائية

مع ترددات لشعاع الليزر $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3$ وبمساعدة الماتلاب الشكل (1-أ) يوضح العلاقة بين الجزء الحقيقي للاستقطابية الكهربائية والمجال الكهربائي، الشكل (1-ب) يوضح العلاقة بين الجزء التخيلي للاستقطابية الكهربائية مع المجال الكهربائي.



الشكل (1أ): الجزء الحقيقي للاستقطابية الكهربائية مع المجال الكهربائي
 $\omega_1 = \omega_2 = (110, 130) \text{ MHz}$



الشكل (1ب): الجزء التخيلي للاستقطابية الكهربائية مع المجال الكهربائي
 $\omega_1 = \omega_2 = (110, 130) \text{ MHz}$

وحل المعادلتين (16)، (17) يكون على الصورة:-

$$U_{n-1} = U_{0nB} e^{ik(n-1)a} [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}] \quad (20)$$

$$U_{n+2} = U_{0n} e^{ik(n+2)a} [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}] \quad (21)$$

وبالتعويض عن المعادلتين (20)، (21) في (18)، (19)، وأيضاً بالتعويض عن قيمة المجال الكهربائي

$$E_1 = E_0 e^{i\omega_1 t}, \quad E_2 = E_0 e^{i\omega_2 t}, \quad E_3 = E_0 e^{i\omega_3 t}$$

نتحصل على:-

$$U_{0n} e^{ik(na)} = \frac{eE_0 [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}]}{C [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}] [2 - e^{ika} - e^{3ika}] e^{-ika} - M_1 [e^{-ika} [\omega_1^2 e^{i\omega_1 t} + \omega_2^2 e^{i\omega_2 t} + \omega_3^2 e^{i\omega_3 t}]] - Be (i^{-ika} [\omega_1 e^{i\omega_1 t} + \omega_2 e^{i\omega_2 t} + \omega_3 e^{i\omega_3 t}])} \quad (22)$$

$$eE [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}]$$

$$\frac{C [2 - e^{-ika} - e^{3ika}] [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}] - M_1 [\omega_1^2 e^{i\omega_1 t} + \omega_2^2 e^{i\omega_2 t} + \omega_3^2 e^{i\omega_3 t}] - Be (i) [\omega_1 e^{i\omega_1 t} + \omega_2 e^{i\omega_2 t} + \omega_3 e^{i\omega_3 t}]}{eE [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}]} \quad (23)$$

ومن المعادلة (21):

$$U_{n+2} = \frac{eE e^{3ika} [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}]}{C [2 - e^{ika} - e^{3ika}] [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}] - M_2 [\omega_1^2 e^{i\omega_1 t} + \omega_2^2 e^{i\omega_2 t} + \omega_3^2 e^{i\omega_3 t}]} \quad (24)$$

وبما أن الاستقطابية الكهربائية تعطى بالعلاقة:-

$$P = n_0 e (U_{n-1} - U_{n+2})$$

بالتالي :-

$$P = n_0 e^2 E \left(\frac{[e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}]}{C [2 - e^{-ika} - e^{3ika}] [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}] - M_1 [\omega_1^2 e^{i\omega_1 t} + \omega_2^2 e^{i\omega_2 t} + \omega_3^2 e^{i\omega_3 t}] - Be (i) [\omega_1 e^{i\omega_1 t} + \omega_2 e^{i\omega_2 t} + \omega_3 e^{i\omega_3 t}]} - \frac{e^{3ika} [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}]}{C [2 - e^{ika} - e^{3ika}] [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}] - M_2 [\omega_1^2 e^{i\omega_1 t} + \omega_2^2 e^{i\omega_2 t} + \omega_3^2 e^{i\omega_3 t}] - Be (i) [\omega_1 e^{i\omega_1 t} + \omega_2 e^{i\omega_2 t} + \omega_3 e^{i\omega_3 t}]} \right) \quad (25)$$

وإذا استخدمنا:-

$$\alpha_1 = C [2 - e^{ika} - e^{3ika}] [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}] - M_1 [\omega_1^2 e^{i\omega_1 t} + \omega_2^2 e^{i\omega_2 t} + \omega_3^2 e^{i\omega_3 t}] - Be (i) [\omega_1 e^{i\omega_1 t} + \omega_2 e^{i\omega_2 t} + \omega_3 e^{i\omega_3 t}]$$

$$\beta_1 = Be [\omega_1 e^{i\omega_1 t} + \omega_2 e^{i\omega_2 t} + \omega_3 e^{i\omega_3 t}]$$

$$\alpha_2 = C [2 - e^{-ika} - e^{3ika}] [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}] - M_2 [\omega_1^2 e^{i\omega_1 t} + \omega_2^2 e^{i\omega_2 t} + \omega_3^2 e^{i\omega_3 t}] - Be (i) [\omega_1 e^{i\omega_1 t} + \omega_2 e^{i\omega_2 t} + \omega_3 e^{i\omega_3 t}]$$

$$\beta_2 = Be [\omega_1 e^{i\omega_1 t} + \omega_2 e^{i\omega_2 t} + \omega_3 e^{i\omega_3 t}] = \beta_1 \quad (26)$$

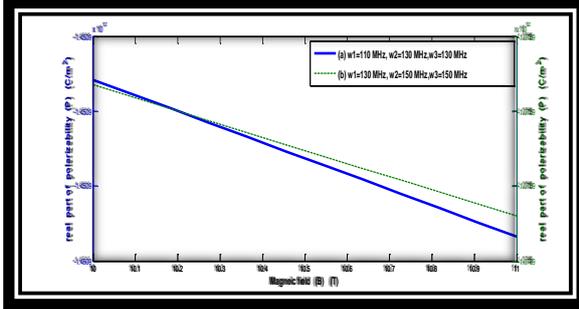
$$P = n_0 e^2 E \left(\frac{\alpha_1 [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}]}{[\alpha_1 + \beta_1]} - \frac{\alpha_2 [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}] e^{3ika}}{[\alpha_2 + \beta_2]} + \frac{i\beta_1 [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}]}{[\alpha_1 + \beta_1]} - \frac{i\beta_2 [e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t} + e^{i\omega_3 t}] e^{3ika}}{[\alpha_2 + \beta_2]} \right) \quad (27)$$

ب- تأثير المجال المغناطيسي على الاستقطابية الكهربائية
وباعادة دراسة الاستقطابية الكهربائية كدالة في المجال المغناطيسي
وذلك عند الترددات :

$$(i) \omega_1 = (110)MHz, \omega_2(130)MHz, \omega_3 = (130)MHz$$

$$(b) \omega_1 = (130)MHz, \omega_2(150)MHz, \omega_3 = (150)MHz$$

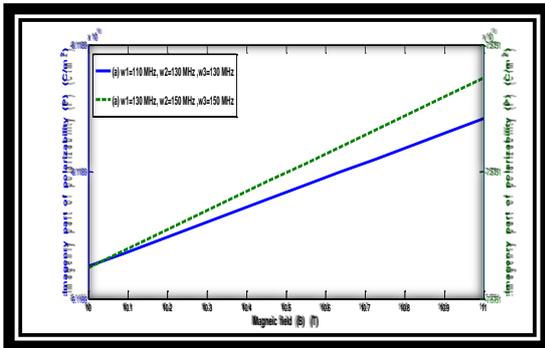
الجزء الحقيقي للاستقطابية الكهربائية موضح بالشكل (5. أ) ،
والجزء التخيلي لها موضح بالشكل (5. ب).



الشكل (5. أ) : الجزء الحقيقي للاستقطابية الكهربائية مع المجال المغناطيسي

$$(a) \omega_1 = (110)MHz, \omega_2(130)MHz, \omega_3 = (130)MHz$$

$$(b) \omega_1 = (130) MHz, \omega_2(150) MHz, \omega_3 = (150)MHz$$



الشكل (5. ب) : الجزء التخيلي للاستقطابية الكهربائية مع المجال المغناطيسي

$$(a) \omega_1 = (110)MHz, \omega_2(130)MHz, \omega_3 = (130)MHz$$

$$(b) \omega_1 = (130) MHz, \omega_2(150) MHz, \omega_3 = (150)MHz$$

ج- تأثير المجال المغناطيسي على المتأثرية الكهربائية
غير الخطية

وبدراسة المتأثرية الكهربائية غير الخطية كدالة في المجال
المغناطيسي عند الترددات :

$$(i) \omega_1 = (110)MHz, \omega_2(130)MHz, \omega_3 = (130)MHz$$

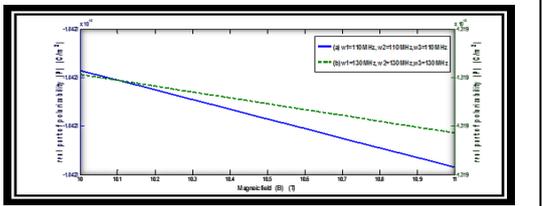
$$(b) \omega_1 = (130)MHz, \omega_2(150)MHz, \omega_3 = (150)MHz$$

الجزء الحقيقي للمتأثرية الكهربائية غير الخطية
موضح بالشكل (6. أ)، والجزء التخيلي للمتأثرية
الكهربائية غير الخطية موضح بالشكل (6. ب).

ب- تأثير المجال المغناطيسي على الاستقطابية الكهربائية
الشكل (2. أ) يوضح العلاقة بين الجزء الحقيقي للاستقطابية
الكهربائية والمجال المغناطيسي الشكل (2.ب) يوضح العلاقة بين
الجزء التخيلي للاستقطابية الكهربائية مع المجال المغناطيسي عند
القيم:

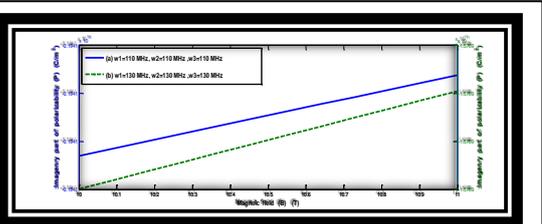
$$\omega_1 = \omega_2 = (110,130) MHz$$

$$\omega_1 = \omega_2 = (110,130) MHz$$



الشكل (2.أ): الجزء الحقيقي للاستقطابية الكهربائية مع المجال المغناطيسي.

$$\omega_1 = \omega_2 = (110, 130)MHz$$



الشكل (2.ب): الجزء التخيلي للاستقطابية الكهربائية مع المجال المغناطيسي.

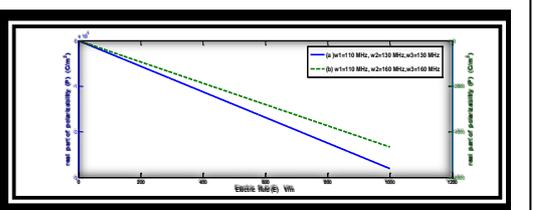
$$\omega_1 = \omega_2 = (110, 130)MHz$$

ثانيا: الدراسة بأشعة الليزر المختلفة التردد

أ- تأثير المجال الكهربائي على الاستقطابية الكهربائية
الشكل (4. أ) يوضح العلاقة بين الجزء الحقيقي للاستقطابية
الكهربائية مع المجال الكهربائي

$$(a) \omega_1 = (110)MHz, \omega_2(130)MHz, \omega_3 = (130)MHz$$

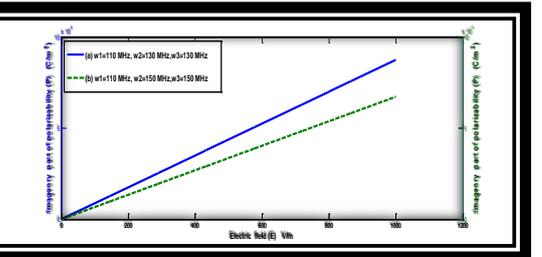
$$(b) \omega_1 = (110) MHz, \omega_2(160) MHz, \omega_3 = (160)MHz$$



الشكل (4. أ) : الجزء الحقيقي للاستقطابية الكهربائية مع المجال الكهربائي

$$(110)MHz, \omega_2(130)MHz, \omega_3 = (130)MHz$$

$$(b) \omega_1 = (110) MHz, \omega_2(160) MHz, \omega_3 = (160)MHz$$



الشكل (4. ب): يوضح الجزء التخيلي للاستقطابية الكهربائية مع المجال الكهربائي

$$(a) \omega_1 = (110)MHz, \omega_2(130)MHz, \omega_3 = (130)MHz$$

$$(b) \omega_1 = (110) MHz, \omega_2(150) MHz, \omega_3 = (150)MHz$$

سلوك عكسي يظهر خلال الشكل (2 ب) حيث يوضح الشكل العلاقة بين الجزء التخيلي للاستقطابية الكهربية والمجال المغناطيسي، ويتضح تناقص في الجزء التخيلي بزيادة المجال المغناطيسي، هذا التناقص يعزى لطاقة ربط الإلكترون مع الذرة التي تزداد بزيادة المجال المغناطيسي، و بزيادة تردد أشعة الليزر الساقطة على لنظام تحت الدراسة يكون معدل الانخفاض بشكل أسرع، وأنه عند قيمة 10.1 (T) للمجال المغناطيسي يكون للجزء الحقيقي للاستقطابية الكهربية قيمة واحدة وان اختلف التردد.

تأثير المجال المغناطيسي على المتأثرية الكهربية غير الخطية
تم دراسة العلاقة بين المتأثرية الكهربية غير الخطية مع المجال المغناطيسي حيث الشكل (3.أ) يوضح العلاقة بين الجزء الحقيقي للمتأثرية الكهربية غير الخطية والمجال المغناطيسي، الشكل (3.ب) يوضح العلاقة بين الجزء التخيلي للمتأثرية الكهربية غير الخطية والمجال المغناطيسي عند القيم

$$\omega_1 = \omega_2 = (110,130) \text{ MHz}$$

يتضح أنه بزيادة المجال المغناطيسي يزداد التشتت (الجزء الحقيقي المتأثرية الكهربية) ويقل الامتصاص وهو (الجزء التخيلي المتأثرية الكهربية).

السبب هو أن المجال المغناطيسي يضغط الدالة الموجية للإلكترون و يزيد تقييد الإلكترون بزيادته لطاقة الربط وتقلص (انكماش) مداراته، ومن الملاحظ أيضا أنه بزيادة تردد شعاعي الليزر الساقطين على النظام تحت الدراسة يكون معدل الزيادة في التشتت مع زيادة المجال المغناطيسي أسرع بينما معدل الانخفاض في الامتصاص يكون بشكل أبطأ، وأنه عند قيمة

10.1 (T) للمجال المغناطيسي يتساوى التشتت (الجزء الحقيقي للمتأثرية الكهربية غير الخطية) وان اختلف التردد.

ثانيا: عندما تكون أشعة الليزر مختلفة التردد

تأثير المجال الكهربي على الاستقطابية الكهربية

لترددات أشعة الليزر الساقطة ذات قيم:

$$(a) \omega_1 = (110) \text{ MHz}, \omega_2 (130) \text{ MHz}$$

$$(b) \omega_1 = (110) \text{ MHz}, \omega_2 (150) \text{ MHz}$$

وبمساعدة الماتلاب الشكل (4.أ) يوضح العلاقة

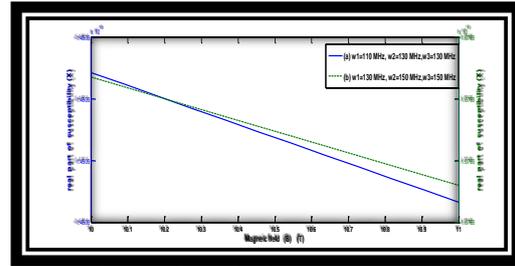
بين الجزء

الحقيقي للاستقطابية الكهربية والمجال الكهربي بينما العلاقة بين الجزء التخيلي للاستقطابية الكهربية والمجال الكهربي موضحة بالشكل (4.ب) يكون واضحا أن دالة الموجة ستزداد كلما زاد المجال الكهربي يعني أنه كلما زادت قيمة المجال الكهربي كلما كانت الاستقطابية الكهربية الناتجة ذات قيمة أعلى. والعكس يحدث لطاقة الربط المرتبطة بالجزء التخيلي للاستقطابية الكهربية ومن الجدير بالذكر أنه عندما كان الفرق بين ترددي أشعة الليزر الساقطة على النظام تحت الدراسة أقل كان معدل تزايد كل من الجزء الحقيقي والجزء التخيلي للاستقطابية الكهربية مع المجال الكهربي بشكل أسرع

تأثير المجال المغناطيسي على الاستقطابية الكهربية

الشكل (5.أ) يوضح العلاقة بين الجزء الحقيقي للاستقطابية الكهربية والمجال المغناطيسي يتضح أن هناك علاقة طردية بينهما إذ أنه بزيادة المجال المغناطيسي يكون هناك زيادة في الجزء الحقيقي للاستقطابية الكهربية، وأنه عند قيمة $(B = 10.2 \text{ T})$ يكون الجزء الحقيقي للاستقطابية الكهربية ثابت حتى عند تغيير ترددات أشعة الليزر الساقطة على النظام تحت الدراسة (لقيم الترددات التي تم دراستها)، وعند قيم أعلى لترددات أشعة الليزر الساقطة على المادة يلاحظ معدل زيادة للجزء الحقيقي للاستقطابية الكهربية مع المجال المغناطيسي أبطأ.

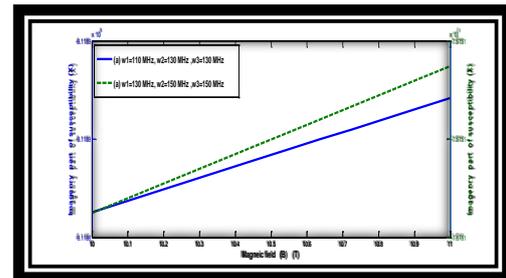
بينما وكما بالشكل (5.ب) تكون العلاقة بين الجزء التخيلي للاستقطابية الكهربية و المجال المغناطيسي علاقة عكسية ويكون هناك تناقص في الجزء التخيلي للاستقطابية الكهربية مع زيادة



الشكل (6. أ): الجزء الحقيقي للمتأثرية الكهربية غير الخطية والمجال المغناطيسي

$$(a) \omega_1 = (110) \text{ MHz}, \omega_2 (130) \text{ MHz}, \omega_3 = (130) \text{ MHz}$$

$$(b) \omega_1 = (110) \text{ MHz}, \omega_2 (150) \text{ MHz}, \omega_3 = (150) \text{ MHz}$$



الشكل (6. ب): الجزء التخيلي للمتأثرية الكهربية غير الخطية مع المجال المغناطيسي

$$(a) \omega_1 = (110) \text{ MHz}, \omega_2 (130) \text{ MHz}, \omega_3 = (130) \text{ MHz}$$

$$(b) \omega_1 = (130) \text{ MHz}, \omega_2 (150) \text{ MHz}, \omega_3 = (150) \text{ MHz}$$

تحليل النتائج

أولاً: عندما تكون أشعة الليزر متساوية الشدة والتردد التفسير الفيزيائي للعلاقة بين الاستقطابية الكهربية مع المجال الكهربي

باستخدام المعادلة (12) مع ترددات لشعاع الليزر $\omega_1 = \omega_2 = (110,130) \text{ MHz}$ وبمساعدة الماتلاب الشكل (1-أ) يوضح العلاقة بين الجزء الحقيقي للاستقطابية الكهربية مع المجال الكهربي،

الشكل (2-ب) يوضح العلاقة بين الجزء التخيلي للاستقطابية الكهربية مع المجال الكهربي.

من الشكلين وجد أنه بزيادة المجال الكهربي تزداد الاستقطابية الكهربية بجزئها الحقيقي والتخيلي ويعزى ذلك لأن دالة الموجة تمد كلما ازداد المجال الكهربي، والعكس يحدث لطاقة الربط المتعلقة بالجزء التخيلي للاستقطابية حيث تقل طاقة الربط (التقييد) بزيادة المجال الكهربي [15] وان المجال الكهربي يؤدي لكسر التماثل في التركيب [16]. ولوحظ (للقيم المدروسة) أنه عندما كان تردد أشعة الليزر أقل كان معدل تزايد الجزء الحقيقي للاستقطابية الكهربية أسرع، بينما معدل تزايد الجزء التخيلي للاستقطابية الكهربية كان أسرع عندما كان تردد شعاع الليزر الساقط على النظام تحت الدراسة أكبر.

تأثير المجال المغناطيسي على الاستقطابية الكهربية

مع تقديم للمجال المغناطيسي وإعادة الدراسة لسلوك الاستقطابية الكهربية عند

$$\omega_1 = \omega_2 = (110,130) \text{ MHz}$$

للمجال الكهربي لأشعة الليزر المسلطة على النظام تحت الدراسة، الشكل (2.أ) يبين العلاقة بين الجزء الحقيقي للاستقطابية الكهربية والمجال المغناطيسي يتضح أن هناك علاقة طردية بينهما إذ أنه بزيادة المجال المغناطيسي يزداد الجزء الحقيقي للاستقطابية الكهربية وانه عندما كان تردد أشعة الليزر الساقطة على النظام تحت الدراسة أقل كان معدل الزيادة بشكل أسرع.

غير الخطية والمجال المغناطيسي في حالة التردد المتساوي، الشكل (6.أ) يوضح العلاقة بين الجزء الحقيقي للمتأثرية الكهربائية مع المجال المغناطيسي والشكل (6.ب) تكون العلاقة بين الجزء التخيلي للاستقطابية الكهربائية مع المجال المغناطيسي في حالة ترددات مختلفة لأشعة الليزر الساقطة.

وجد أنه بزيادة المجال المغناطيسي يزداد التشتت (الجزء الحقيقي للمتأثرية الكهربائية) ويقل الامتصاص وهو (الجزء التخيلي للمتأثرية الكهربائية). السبب هو أن المجال المغناطيسي يضغط الدالة الموجية للإلكترون ويزيد تقييد الإلكترون بزيادته لطاقة الربط وتقلص (انكماش) مداراته.

وعند تساوي الترددات وجد أنه بزيادة تردد شعاع الليزر الساقطين على النظام تحت الدراسة يكون معدل الزيادة في التشتت مع زيادة المجال المغناطيسي أسرع بينما معدل الانخفاض في الامتصاص يكون بشكل أبطأ، وأنه (وللقيم التي تم دراستها) عند قيمة 10.1 (T) للمجال المغناطيسي يتساوى التشتت (الجزء الحقيقي للمتأثرية الكهربائية غير الخطية) وان اختلف التردد.

أما في حالة الترددات المختلفة عند قيمة $(B = 10.2 \text{ T})$ يكون التشتت (الجزء الحقيقي للمتأثرية الكهربائية) ثابت حتى عند تغيير ترددات أشعة الليزر الساقطة على النظام تحت الدراسة، وعند قيم أعلى لترددات أشعة الليزر الساقطة على المادة يلاحظ معدل زيادة التشتت مع المجال المغناطيسي أبطأ و معدل انخفاض الامتصاص مع المجال المغناطيسي أسرع.

التطبيقات

تمت الاستفادة من دراسة الخواص البصرية غير الخطية للنظام الذري ذو الأربع مستويات من الطاقة في تفاعل أشعة الليزر مع الذرات الباردة مثل عنصر الربيديوم ($Rb87$) وذرات عنصر السترونشيوم (Cs) وذرات عنصر الصوديوم ($Na2$). واستفيد منها عمليا في قياس مدى تأثير خصائص الامتصاص في النظام الذري ذو الأربع مستويات من الطاقة بالترابط الناتج عن الفراغ الحصول على أطيف الشعاع التلقائي، الترابط الناتج عن تعداد السكان (population inversion)، السماح بتوليد الضوء خلال وسط ذري معتم من خلال الشفافية الناتجة عن الكهرومغناطيسية [17] وكذلك تماسك البصريات غير الخطية عند مستويات الضوء المنخفضة، انتشار الضوء فائق المعان والتخزين الخفيف.

الخلاصة

تم دراسة تأثير المجال المغناطيسي على المتأثرية الكهربائية غير الخطية تفصيلا. وباستخدام معادلات الحركة التي تم استنتاجها وبمساعدة الماتلاب تم دراسة تأثير تغيير ترددات أشعة الليزر الساقطة على النظام تحت الدراسة على كل من الامتصاص والتشتت لأشعة الليزر الساقطة على النظام ذي الأربع مستويات من الطاقة باعتبار اللاخطية. بينت النتائج أنه بزيادة ترددات أشعة الليزر الساقطة التشتت (الجزء الحقيقي للمتأثرية الكهربائية) يزداد بينما يقل الامتصاص (الجزء التخيلي للمتأثرية الكهربائية)، ولكن مع زيادة الفرق بين الترددات لأشعة الليزر معدل انخفاض الجزء التخيلي للمتأثرية الكهربائية سيكون أكثر سرعة.

المراجع

- [1] German J. de Valcarcel and Eugenio Roldan, "Semiclassical theory of amplification and lasing", Revist A Mexicana De Fisica E 52(2) 198-214, 2006.
- [2] Michiel. J. A. de Dood, "second harmonic generation", Jan 24.2006.
- [3] S. Kryszewski, " Quantum Optics", March 4,2010.
- [4] Haper, P. and Wherett, B., "Non-linear Optics", London Academic Press, 1981.

المجال المغناطيسي ويلاحظ أنه بزيادة قيمة ترددات أشعة الليزر الساقطة على المادة يكون معدل الانخفاض للجزء التخيلي للاستقطابية الكهربائية مع المجال المغناطيسي أسرع.

تأثير المجال المغناطيسي على المتأثرية الكهربائية

الشكل (6.أ) يوضح العلاقة بين الجزء الحقيقي للمتأثرية الكهربائية مع المجال المغناطيسي يتضح أن هناك علاقة طردية بينهما إذ أنه بزيادة المجال المغناطيسي يكون هناك زيادة في الجزء الحقيقي للمتأثرية الكهربائية، وأنه عند قيمة $(B = 10.2 \text{ T})$ يكون الجزء الحقيقي للمتأثرية الكهربائية ثابت حتى عند تغيير ترددات أشعة الليزر الساقطة على النظام تحت الدراسة (لقيم الترددات التي تم دراستها)، وعند قيم أعلى لترددات أشعة الليزر الساقطة على المادة يلاحظ معدل زيادة للجزء الحقيقي للاستقطابية الكهربائية مع المجال المغناطيسي أبطأ.

بينما وكما بالشكل (6.ب) تكون العلاقة بين الجزء التخيلي للاستقطابية الكهربائية

و المجال المغناطيسي علاقة عكسية ويكون هناك تناقص في الجزء التخيلي للاستقطابية الكهربائية مع زيادة المجال المغناطيسي ويلاحظ أنه بزيادة قيمة ترددات أشعة الليزر الساقطة على المادة يكون معدل الانخفاض للجزء التخيلي للاستقطابية الكهربائية مع المجال المغناطيسي أسرع.

مقارنة النتائج:

1- تأثير المجال الكهربائي على الاستقطابية الكهربائية

بمقارنة الشكل (1-أ) مع الشكل (4.أ)، الشكل (2-ب) مع الشكل (4.ب) وجد أنه بزيادة المجال الكهربائي تزداد الاستقطابية الكهربائية بجزئها الحقيقي والتخيلي ويعزى ذلك لأن دالة الموجة تمد كلما ازداد المجال الكهربائي، والعكس يحدث لطاقة الربط المتعلقة بالجزء التخيلي للاستقطابية حيث تقل طاقة الربط (التقييد) بزيادة المجال الكهربائي.

وأنه في الحالتين (سواء أكانت أشعة الليزر متساوية أو مختلفة التردد) عندما كان تردد أشعة الليزر أقل كان معدل تزايد الجزء الحقيقي للاستقطابية الكهربائية أسرع.

بينما كان معدل تزايد الجزء التخيلي للاستقطابية الكهربائية أسرع (في حالة التردد المتساوي لأشعة الليزر) عندما كان تردد شعاع الليزر الساقط على النظام تحت الدراسة أكبر. بينما عندما كان الفرق بين ترددي أشعة الليزر الساقطة على النظام تحت الدراسة أقل كان معدل تزايد التخيلي للاستقطابية الكهربائية مع المجال الكهربائي بشكل أسرع (في حالة التردد المختلف لأشعة الليزر).

تأثير المجال المغناطيسي على الاستقطابية الكهربائية-2

الشكل (2.أ) يبين العلاقة بين الجزء الحقيقي للاستقطابية الكهربائية والمجال المغناطيسي في حالة تساوي التردد لأشعة الليزر الساقطة أما الشكل (5.أ) يوضح العلاقة بين الجزء الحقيقي للاستقطابية الكهربائية والمجال المغناطيسي عند اختلاف التردد.

يتضح من الشكلين أن هناك علاقة طردية إذ أنه بزيادة المجال المغناطيسي يزداد الجزء الحقيقي للاستقطابية الكهربائية. ووجد (في حالة الترددات المتساوية لأشعة الليزر الساقطة) انه بزيادة تردد أشعة الليزر الساقطة على النظام تحت الدراسة كان معدل الزيادة بشكل أبطأ. أما (في حالة الترددات المختلفة لأشعة الليزر الساقطة) كان معدل زيادة الجزء الحقيقي للاستقطابية الكهربائية مع المجال المغناطيسي أبطأ.

3-تأثير المجال المغناطيسي على المتأثرية الكهربائية غير الخطية

تم دراسة العلاقة بين المتأثرية الكهربائية غير الخطية مع المجال المغناطيسي حيث الشكل (3.أ) يوضح العلاقة بين الجزء الحقيقي للمتأثرية الكهربائية غير الخطية والمجال المغناطيسي، الشكل (3.ب) يوضح العلاقة بين الجزء التخيلي للمتأثرية الكهربائية

- [5] H. Zernike and J.E. Midwinter, "Applied Non-linear Optics", New York,2007, p. 64.
- [6] A. Imamoglu and S.E. Harris, "Lasers without inversion" Opt. Lett. 14, 1344(1989).
- [7] R. Yasuhara, S. Tokita, J. Kawanaka, T. Kawashima, H. Kan, H. Yagi, H. Nozawa, T. Yanagitani, Y. Fujimoto, H. Yoshida, M. Nakatsuka, Opt. Express 15 (2007)11255e11261.[8] D. Ashkenasi, A. Rosenfeld, H. Varel, M. Wehmer, E.E.B. Campbell, J. Appl. Surf.Sci. 120 (1997) 65e80.
- [9] K. Nawata, Y. Ojima, M. Okida, T. Ogawa, T. Omatsu, Opt. Express 14 (2006)10657e10662.
- [10] M.I.K. Santala, M. Zepf, F.N. Beg, E.L. Clark, A.E. Dangor, K. Krushelnick, M. Tatarakis, I. Watts, K.W.D. Ledingham, T. McCanny, I. Spencer, A.C. Machacek, R. Allott, R.J. Clarke, P.A. Norreys, J. Appl. Phys. Lett. 78 (2001)19e21.
- [11] V. Yu. Bychenkov, K. Flippo, Anatoly Maksimchuk, S. Gu, "Forward Ion Acceleration in Thin Films Driven by a High-Intensity Forward Ion Acceleration in Thin Films Driven by a High-Intensity Laser Laser", University of Nebraska - Lincoln
- [12] C. G. Durfee III and H. M. Milchberg, "Light pipe for high intensity laser pulses", PHYSICAL REVIEW LETTERS VOLUME 71, NUMBER 15, PP 52.40, 11 OCTOBER 1993.[13] T.H. Maiman, "The Laser InVENTOR", 2018.
- [14] C-Killel, Introduction to Solid State Physics- John Willey & Sons-New York
- [15]. John Weiner, "Light-Matter Interaction: Fundamentals and Applications", College Park, Maryland 20742 U.S.A, October 2, 2002.
- [16] The physics of everyday phenomena, W.Thomas Griffith, fourth edition, Higher education, 2004
- [17] **Young Researchers and Elite Club," ELECTRONIC HEAT CAPACITY AND MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF FERROMAGNETIC SILICENE SHEET UNDER STRAIN", SOLID STATE COMMUNICATIONS V250, PP84-91 January 2017.**