دراسة تحليلية لمضخم MOPA في ليزر Nd:YAG النبضي

* د. الجغامي عصام
** أ. الطالب خالد

* قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة دمشق.
** قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة الفرات.

❖ **الملخص:**

تناول هذا البحث ظاهرة أساسية تتضمن نظرية تضخيم النبضة، حيث أعطي وصفاً لمضخم ليزر Nd:YAG النبضي، ودُرس التضخيم تجريبياً من مرحلة واحدة في ليزر Nd:YAG النبضي والذي يسمى مفهوم MOPA (مضخم استطاعة هزاز - رئيسي). كما وقدم وصفاً مفصلاً لعملية تضخيم النبضة والمعادلات المستخدمة في حساب كثافة الإسكان المعكوس وشدة جريان الفوتون للنبضة الواردة عند أي نقطة x خلال الزمن t والتي تسمح لاحقاً بحساب طاقة خرج المضخم والربح الناتج عن عملية التضخيم. تضمن البحث أيضاً دراسة تغيرات طاقة نبضة الخرج عند قيم مختلفة لجهد الضخ من أجل دخل ثابت للإشارة، وكذلك تغيرات خرج المضخم بدلالة الدخل من أجل قيم جهد ضخ مختلفة للمضخم. جرى حساب الربح الناتج عن عملية التضخيم للنظام المدروس. درست العلاقة بين المتغيرات المختلفة مثل طاقة الاشباع وطاقة الدخل وطاقة الخرج ومعامل ربح الاشارة الصغيرة g_0، وربح الاشارة الصغيرة G_0، وكفاءة الانتزاع η.

الكلمات المفتاحية: مضخم استطاعة هزاز - رئيسي (MOPA)، تضخيم النبضة، جريان الفوتون، الضخ، طاقة الخرج.

❖ **مقدمة:**

تعتبر عملية تضخيم ضوء الليزر من العمليات الهامة والضرورية للحصول على استطاعة خرج عالية ونبضات ذات طاقة عالية جداً، حيث يحد الهزاز من سطوع الأشعة الليزرية الصادرة منه. ويمكن من خلال عملية التضخيم الحصول على استطاعة قمة في مجال البيكوواط (pw)، واستطاعة خرج متوسطة من 100w إلى 1kw, وطاقة من 10 J إلى 100 J بانعراج محدود للشعاع. يتكون المضخم من مادة فعالة تُضخ كما في الهزاز، ولكن لا يوجد مرنان لتحديد خصائص الضوء. لهذا السبب تحدد خصائص ضوء المضخم بواسطة الضوء الصادر من هزاز الليزر، لكن قد يحدث أثناء هذه العملية ضجيج إضافي. أما طريقة ضخ المادة الفعالة للمضخم فتكون مشابهة لطرق ضخ الهزاز (MENZEL,2007) .

تستدعي الحاجة في بعض التطبيقات، إلى امتلاك طاقة أو استطاعة عالية جداً لحزمة الليزر. لكن يصعب تحقيق هذه الطاقة العالية لليزر باستخدام الهزاز فقط. حيث عند زيادة هذه الطاقة أو استطاعة الخرج لليزر تختلف دلائل الليزر مثل زاوية انعراج حزمة الضوء ووحدانية اللون وطول النبضة وأداء التعديل وغيرها. تجدر الإشارة إلى أنه ليس بالإمكان تحقيق الطاقة العالية عن طريق زيادة طول أو قطر المادة الفعالة كثيراً. بالإضافة إلى ذلك، بسبب اجتياز حزمة الليزر الوسط الفعال ذهاباً وإياباً عدداً من المرات، سيحدث تهشم في هذا الوسط الفعال. من ناحية أخرى يمكن باستعمال تقنية Q-switch أو قفل النمط Mode-Locking للحصول على استطاعة ذروة عالية للغاية، تتراوح قيمها ضمن (10^{9}-10^{12} watt)، كون الطاقة تصدر في فترة زمنية قصيرة جداً. لكن في الحقيقة لا تكون طاقة الخرج الصادرة من الهزاز باستطاعة الذروة العالية كبيرة جداً، ولهذا السبب أفضل طريقة للحصول على ليزر طاقة عالية بأداءٍ ممتازٍ هي تطبيق تقنية تضخيم الضوء (XINJU,2010),(SILFVAST,2004).

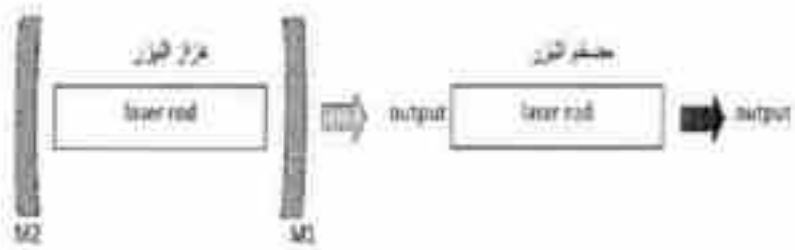
عادةً ما توضع هذه المضخمات في المواقع الخلفية وعلى خط الخرج لليزر حيث تعطي المزيد من الفوتونات، أي فوتونات إضافية للشعاع في تطابق مع الشعاع الداخل (SILFVAST,2004).

يعتمد مضخم الليزر والهزاز على العمليات الفيزيائية نفسها التي يعتمد عليها اصدار الليزر وهي تضخيم الضوء بالإصدار المحثوث، لكن الاختلاف الأساسي هو غياب المجاوب في حالة مضخم الليزر، فعندما تعبر إشارة النبضة الضوئية المتولدة في الهزاز المادة الفعالة للمضخم، يتولد في المضخم الإشعاع المحثوث القوي عن طريق الجسيمات الواقعة في الحالة المثارة والناتجة بفعل الإشارة الضوئية الواردة. إن الاشعاع المحثوث في المضخم يكون متراكباً مع الإشارة الضوئية الواردة، وبالنتيجة سوف يحصل التضخيم، تُسمى هذه التقنية تضخيم الموجة المسافرة. يحتاج مضخم الليزر لمادة فعالة يكون فيها الإسكان المعكوس كافٍ لضمان الربح عندما تعبر من خلالها إشارة النبضة الضوئية، هذا يعني أن الربح يجب أن يكون أعلى من الضياعات جميعاً في الوسط الفعال (XINJU,2010).

❖ النظرية :

1) هزاز - مضخم (MOPA):

يُصنف هزاز- مضخم (MOPA) من ابسط أنوع من أنواع المضخمات الليزرية حيث نضع خلف الهزاز مضخم فيصبح الخرج هو دخل للمضخم الشكل(1). هذا الترتيب يدعى مضخم استطاعة هزاز- رئيسي (MOPA).



الشكل(1): مخطط لنظام (هزاز - مضخم) المستخدم في الليزر Nd:YAG النبضي.

تعبر النبضة القادمة من الهزاز المادة الفعالة للمضخم ولمرة واحدة فقط. مع الإشارة إلى أن المضخم من هذا النوع يملك كل الخصائص الطيفية الزمانية والمكانية للهزاز، ولكن طاقته أعلى من التي ينتجها الهزاز وحيد(FERMANN and others,2003) .

يعتمد أسلوب اختيار مضخم معين على مستوى الطاقة والخصائص الزمنية والطيفية لإشارة الدخل بالإضافة إلى طاقة أو استطاعة الخرج المطلوبة(KOECHNER,2006) .

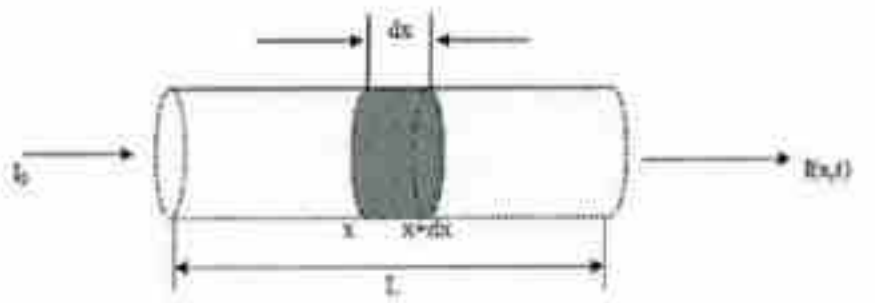
تملك دراسة تقنية تضخيم الموجة المسافرة أو مضخم (MOPA) الفوائد التالية:

- أولاً: تعبر حزمة الليزر وسط التضخيم في عبور وحيد، حيث تزداد عتبة ضرر الوسط كثيراً، حيث لا يتهشم تشغيل المضخم بسهولة وسط.
- ثانياً: في نظام هزاز- مضخم. يمكن تحديد عرض النبضة وطول الخط الطيفي وزاوية انعراج حزمة الضوء من الهزاز، بينما المضخم يحدد طاقة أو استطاعة خرج الليزر(XINJU,2010) .

2) معادلة مضخم النبضة(The Equation of the Pulse Amplifier):

يُبين الشكل (2) مخططاً لعملية التضخيم. إذا كان طول مادة تشغيل الليزر L ونبضة الإشارة الضوئية تدخل ضمنها في الاتجاه x، فإن الإشارة الضوئية تتضخم بانتظام أثناء عبورها مادة التشغيل كونها تستهلك الإسكان المعكوس بانتظام. عندئذٍ سيكون كل من عدد الفوتونات $\emptyset(x,t)$ والإسكان المعكوس $\Delta n(x,t)$ بواحدة الحجم تابعاً للزمن t والمكان x، يُفترض أن يكون الإسكان المعكوس في المقطع العرضي لمادة تشغيل المضخم موزعاً بانتظام، ويُهمل تأثير كل من النفوذ وعرض الخط الطيفي ونوع الخط والضخ الضوئي والإشعاع الامتصاصي في الإسكان المعكوس. تعطى معادلة معدل كثافة الإسكان المعكوس من أجل أربع سويات طاقة على النحو الآتي:

$$\frac{\partial \Delta n(x,t)}{\partial t} = -\sigma \Delta n(x,t) I(x,t) \qquad (1)$$



الشكل (2) :رسم تخطيطي لعملية التضخيم.

بإهمال كل خسائر المضخم، يكون معدل التغير في عدد الفوتونات ضمن عنصر الحجم خلال الزمن dt هو المجموع الجبري لعدد الفوتونات المتولدة بالإشعاع المحثوث وعدد الفوتونات الصافي الداخل لعنصر الحجم، وفقاً لذلك يمكن كتابة ذلك رياضياً بالعلاقة الآتية:

$$\frac{\partial \emptyset(x,t)}{\partial t}dxdt = [\emptyset(x,t) - \emptyset(x+dx,t)]Cdt + \sigma C\emptyset(x,t)\Delta n(x,t)dxdt \qquad (2)$$

من هنا يمكن التعبير عن معدل تغير كثافة عدد الفوتونات بمعادلة تفاضلية جزئية من الشكل الآتي:

$$\frac{\partial \emptyset(x,t)}{\partial t} + C\frac{\partial \emptyset(x,t)}{\partial x} = \sigma C\emptyset(x,t)\Delta n(x,t) \qquad (3)$$

أن عدد الفوتونات المتدفق عبر واحدة المقطع العرضي في واحدة الزمن يسمى تدفق الفوتون ويرمز له بالرمز $I(x,t)$ ، ويعطى بالشكل: $I(x,t) = C\,\emptyset(x,t)$

من الآن إن المعادلة التي تصف معدل تغير شدة جريان الفوتون تكون:

$$\left\{\frac{\partial I(x,t)}{\partial x} + \frac{1}{C}\frac{\partial I(x,t)}{\partial t}\right\} = \sigma\Delta n(x,t)I(x,t) \qquad (4)$$

أذا كانت شدة جريان الفوتون الابتدائية لإشارة الدخل التي يجري تضخيمها هي $I_0(t)$ وتدخل مادة التشغيل عند x=0، فأنه قبل دخول الإشارة إلى المضخم، تكون

كثافة الإسكان المعكوس الابتدائية لمادة التشغيل هي $\Delta n_0(x)$، عندئذ تُعطى الشروط الحدية لمعادلة المعدل على النحو الآتي:

$$I(0,t) = I_0(t) \qquad \text{عندما} \qquad x = 0$$

$$\Delta n(x, t < 0) = \Delta n_0(x) \qquad \text{عندما} \qquad 0 < x < L$$

استناداً إلى هذ الشروط الحدية، يمكن حل المعادلات التفاضلية (1) و (4) معاً، وحساب شدة جريان الفوتون والإسكان المعكوس لإشارة النبضة الواردة والتي تدخل للمضخم عند أي موضع x في أية لحظة t، فضلاً عن حساب طاقة نبضة الخرج وربح المضخم وهذا ما سيرد لاحقاً(XINJU, 2010).(SVELTO,1998) .

3) نظرية مضخم النبضة (The Theory of the Pulse Amplifier):

ففي حالة أحادية البعد لحزمة أحادية اللون تسقط على السطح الأمامي لقضيب مضخم طوله L، تتحدد نقطة دخول الشعاع إلى وسط الربح بالنقطة المرجعية x=0. عندئذ يجب حل المعادلتين التفاضليتين (1) و(3) لأجل كثافة إسكان معكوس n وجريان الفوتون Ø. لقد قام كل منفرانتز ونودفك، بحل المعادلات اللاخطية، من أجل أشكال مختلفة لنبضة الدخل(Frantz and Nodvik,1963) .

يعطى الحل بالعلاقة:

$$G = \frac{1}{\gamma\sigma I_0 t_p} \ln\{1 + [\exp(\gamma\sigma I_0 t_p) - 1]e^{n\sigma l}\} \qquad (5)$$

يدعى G_E معامل تضخيم الطاقة. تُبين هذه المعادلة أن ربح طاقة المضخم يتعلق بعوامل هامة من مثل الإسكان المعكوس الكلي، وطول مادة التضخيم، وسعة إشارة النبضة الواردة، وعرض النبضة. لهذا من الضروري مناقشة العلاقة بين ربح الطاقة والمتغيرات المناسبة في ثلاث حالات مختلفة، على النحو الآتي:

1- عندما تكون طاقة إشارة النبضة الواردة صغيرة أو تكون النبضة قصيرة جداً. عندئذٍ تتحقق المتراجحات الآتية:

$$2\sigma I_0 \tau \ll 1$$

$$2\sigma I_0 \tau \exp(\sigma \Delta n_0 L) \ll 1$$

يمكن الآن بنشر المقدار $\exp(2\sigma I_0 \tau)$ على هيئة سلسلة تايلور، ومن ثم بنشر العلاقة اللوغاريتمية، وإهمال الحد الثاني لصغره الحصول على العلاقة الأتية:

$$G_E \approx \exp(\sigma \Delta n_0 L) \qquad (6)$$

تمثل هذه العلاقة ربح الطاقة بحالة الإشارة الصغيرة. يتضح من ذلك أن الميزة الأساسية هنا هي أن الربح لا يتعلق بشدة الإشارة الواردة، بل يزداد أسياً بزيادة طول المضخم وكثافة الإسكان المعكوس. فضلاً عن ذلك، عندما يبدأ تضخيم الإشارة الصغيرة فإنه يحصل تضخيم للنبضة الكاملة بالطريقة نفسها، ولهذا السبب لا يحصل أي تشويه لشكل هذه النبضة.

2- عندما تكون إشارة النبضة الواردة قوية جداً. هذا يعني أن:

$$2\sigma I_0 \tau \gg I$$

لهذا السبب، يمكن كتابة المعادلة (5) على نحوٍ تقريبي وفق الآتي:

$$G_E \approx 1 + \frac{\Delta n_0 L}{2 I_0 \tau} \qquad (7)$$

تدل هذه المعادلة على أنه عندما تكون الإشارة الواردة قوية جداً، فإن الربح سوف يتناقص بزيادة الإشارة الواردة أو يحصل الإشباع. يعود السبب في ذلك إلى أنه عندما تكون الإشارة الواردة كبيرةً بما فيه الكفاية. فإن الإسكان المعكوس يُستهلك جزئياً عند الحافة الأمامية للنبضة. لهذا سوف يكون الربح في الحافة الخلفية من النبضة أصغر بكثير من الربح عند الحافة الأمامية، وهذا يؤدي إلى نقصان عرض النبضة وبالنتيجة تشوه شكل نبضة الخرج.

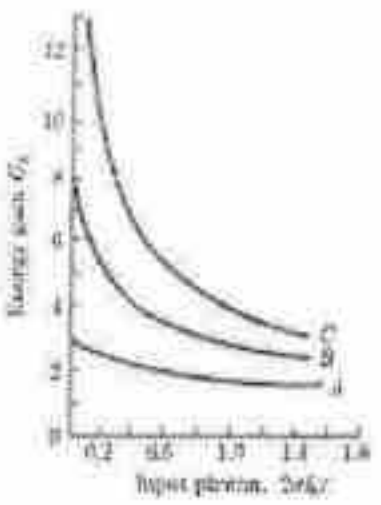
3- عندما تكون الإشارة الواردة ليست قوية جداً (متوسطة)، لكن طول المضخم طويل بما فيه الكفاية. عندئذٍ يمكن التعبير عن ذلك على النحو الآتي:

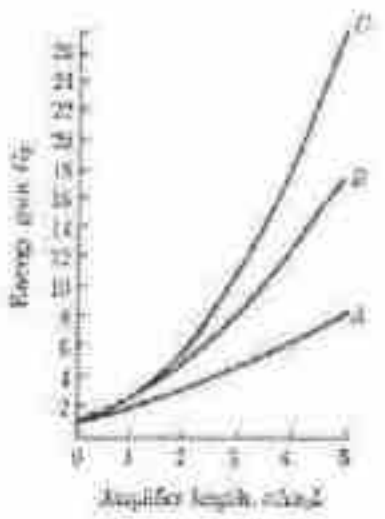
$$\sigma \Delta n_0 \, L \gg l$$

في هذه الحالة سوف تبقى حادثة إشباع الربح. يعود السبب في ذلك إلى أنه عندما تعبر إشارة النبضة الضوئية وسط التضخيم، فإن الربح في البداية يزداد ازدياداً أسياً لكن بعد النمو على طول مسافة محددة، تصبح طاقة النبضة الضوئية قوية بما فيه الكفاية، وينتاقص الإسكان المعكوس فجأةً ويدخل في مجال الزيادة الخطية حتى تُستهلك الطاقة المختزنة جزئياً. بافتراض أن مجال الربح الأُسي أقصر من مجال الربح الخطي، عندئذٍ يكون ربح الطاقة هو:

$$G_E \approx \frac{\Delta n_0 L}{2 I_0 \tau} \qquad (8)$$

استناداً إلى التحليل الوارد آنفاً يمكن القول أن الزيادة في طول المضخم L من جهة، ومن جهة أخرى تعزيز كثافة الإسكان المعكوس الكلي Δn_0 سوف يزيدان ربح طاقة المضخم،. يُبين الجزء الأيسر من الشكل (3) تغيرات ربح الطاقة بدلالة تدفق الفوتون الوارد عند قيم مختلفة لطول المضخم $\sigma \Delta n_0 L$. في حين يُبين الجزء الأيمن من الشكل (3) تغيرات ربح الطاقة بدلالة طول المضخم عند قيم مختلفة لتدفق الفوتون $2\sigma I_0 \tau$ (KOECHNER,2006),(XINJU,2010).





الشكل (3): الجزء الأيمن: تغيرات ربح الطاقة بدلالة طول المضخم عند تدفقات مختلفة للفوتون (المنحني A: $2\sigma I_0\tau=0.6$ ،B: $2\sigma I_0\tau=0.2$ ،C: $2\sigma I_0\tau=0.1$). الجزء الأيسر: ربح الطاقة بدلالة تدفق الفوتون الوارد عند أطوال مختلفة للقضيب (المنحني A: $\sigma\Delta n_0L=1$ ،B: $\sigma\Delta n_0L=2$ ،C: $\sigma\Delta n_0L=3$).

الآن من الضروري أن تحوي العلاقة (5) على متغيرات الليزر القابلة للقياس على نحوٍ مباشرٍ.

لهذا بالإمكان إدخال طاقة الدخل لكل وحدة مساحة التي تُعطى بالعلاقة الآتية:

$$F_{in} = F_0 = c\emptyset_0 t_p h\upsilon \qquad (9)$$

وأما طاقة الإشباع F_{sat} فتُعطى بالعلاقة:

$$F_{sat} = \frac{h\upsilon}{\gamma\sigma} = \frac{F_{sto}}{\gamma g_0} \qquad (10)$$

حيث $F_{sto} = h\upsilon\Delta n$ هي الطاقة المختزنة لكل واحدة حجم و $g_0 = \Delta n\sigma$ معامل ربح الإشارة الصغيرة. فمن أجل نظام ذي أربع سويات طاقة $\gamma=1$، تُعطى الطاقة المختزنة الكلية لكل واحدة حجم في المضخم بالعلاقة:

$$F_{sto} = g_0 F_{sat} \qquad (11)$$

من ناحية أخرى كفاءة الانتزاع η_E هي الطاقة المنتزعة من المضخم مقسومة على الطاقة المختزنة في مستوي الليزر الأعلى لحظة وصول النبضة. لهذا يمكن كتابة كفاءة الانتزاع بالعلاقة:

$$\eta = \frac{F_{out} - F_{in}}{g_0 L F_{sat}} \qquad (12)$$

حيث F_{out} ، F_{in} طاقة إشارة خرج ودخل المضخم على الترتيب. من الضروري التنويه إلى أنه في نظام أربع سويات طاقة يمكن انتزاع كامل الطاقة المختزنة نظرياً بواسطة

الإشارة. بتعويض قيم المتغيرات الواردة أعلاه في العلاقة (5) التي تعطي الربح في طاقة حزمة الضوء العابرة للمضخم يكون:

$$G = \frac{F_{sat}}{F_{in}} \ln\left\{1 + \left[\exp\left(\frac{F_{in}}{F_{sat}}\right) - 1\right] G_0\right\} \qquad (13)$$

تربط هذه العلاقة بين الربح G وكثافة طاقة نبضة الدخل F_{in}، والإشباع F_{sat} وربح الإشارة الصغيرة للعبور المفرد بحالة عبور واحد G_0 الذي يُعطى بالعلاقة:

$$G_0 = exp(g_0.L)$$

إن المعادلة(13) صحيحة من أجل نبضات مستطيلة الشكل، وتشمل مجالاً واسعاً من الربح بدءاً من ربح الإشارة الصغيرة وصولاً إلى الإشباع الكامل للمضخم. يمكن تبسط هذه المعادلة بأخذ بعض الحالات الخاصة الآتية:

1- أذا كانت إشارة دخل F_{in} منخفضة فأنه $\frac{F_{in}}{F_{sat}} << 1$ ، أي $\frac{G_0 F_{in}}{F_{sat}} << 1$ بالإمكان أن تقرب المعادلة (13) على النحو الآتي:

$$G \approx G_0 = \exp(g_0 L) \qquad (14)$$

في هذه الحالة. يكون ربح المستوي المنخفض أسياً على طول المضخم ولا يوجد تأثيرات للإشباع. وبالطبع، يكون التأثير فقط لطول القضيب حيث كثافة طاقة الخرج $F_{in}G_0$ تكون صغيرة بالمقارنة مع F_{sat}.

2- إذا كانت كثافات طاقة المستوي العالي تحقق المتراجحة $\frac{F_{in}}{F_s} >> 1$ فأن المعادلة (13) تُختزل على النحو الآتي:

$$G \cong 1 + \left(\frac{F_s}{F_{in}}\right) g_0 L \qquad (15)$$

في هذه الحالة يكون ربح الطاقة خطياً على طول وسط الربح. هذا يدل على أن كل حالة مثارة تساهم بإصدارها المحثوث في الأشعة الصادرة. من الواضح أن مثل هذا

الشرط يمثل التحول الأكثر كفاءة للطاقة المختزنة إلى طاقة الحزمة، ولهذا السبب تُستخدم تصاميم المضخم التي تعمل في حالة الإشباع.

واحدة من النقاط الهامة في المعادلة (15) التي تُفيد عند تصميم مضخمات الليزر، أنه عند معرفة نقطة بيانات واحدة للمضخم المدروس، فإنه بالإمكان حساب أداء المضخم عند شروط تشغيل مختلفة(KOECHNER,2006).

النتائج والمناقشة:[1]

1- دراسة تغيرات خرج المضخم بدلالة جهد الضخ من أجل دخل ثابت للإشارة الصادرة من الهزاز:

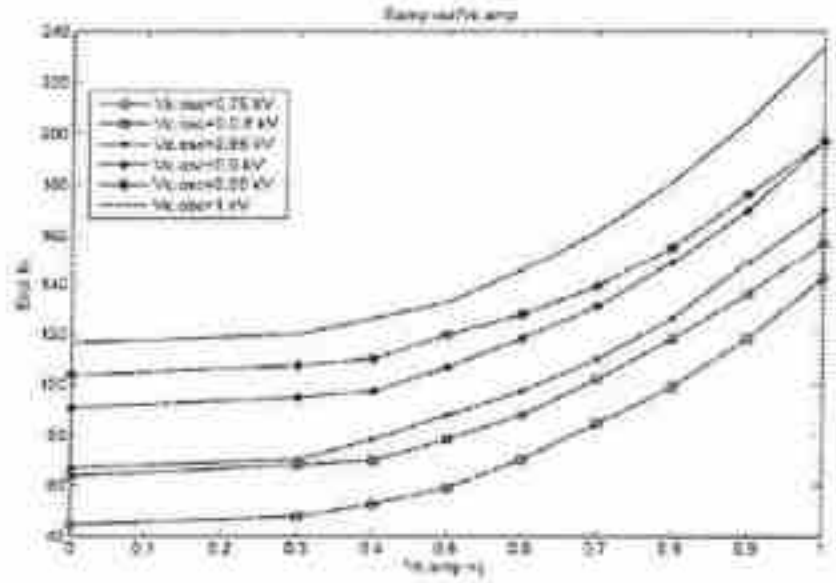
- يُثبت دخل المضخم وذلك بتثبيت جهد الضخ للهزاز $V_{c.osc}$. يجري الحصول على خرج الهزاز أي دخل المضخم $V_{osc.out}$ على الحساس باستخدام التحويل الآتي: Responsively=4.889 V/J
- تُقسم القيمة الحاصلة على نسبة التحويل في الحساس، فينتج خرج الهزاز الذي هو دخل للمضخم، أي $E_{osc.out}=E_{amp.in}$.
- تُؤخذ قيماً مختلفة لضخ المضخم $V_{c.amp}$، وتُجرى عمليات القياس.

[1] تم أخذ القياسات التجريبية على جهاز ليزر Nd:YAG النبضي.

الجدول (1): قيم طاقات نبضة الخرج $E_{amp.out}$ عند قيم مختلفة لجهد ضخ المضخم $V_{e.amp}$، وقيم مختلفة لطاقة نبضة الدخل $E_{amp.in}$.

$V_{e.amp}$ (kV)	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1
$E_{amp.in}$ (mJ)	59.2	92.8	112	131.2	152	168
$V_{e.amp}$ (kV)	$E_{amp.out}$ (mJ)					
0	44.8	64	67.2	91.2	104	116.8
0.3	48	68.4	70.4	95.1	107.8	120
0.4	52.8	70	78.4	97.6	110.4	126.4
0.5	59.2	78.4	88	107.2	120	132.8
0.6	70.4	88	97.6	118.4	128	145.6
0.7	84.8	102.4	110.4	131.2	139.2	161.6
0.8	99.2	118.4	126.4	148.8	155.2	180.8
0.9	118.4	136	148.8	169.6	176	204.8
1	142.4	156.8	169.6	196.8	196.8	233.6

الشكل (4) حيث نلاحظ أنه تبدأ عملية التضخيم عند جهد ضخ للمضخم 0.7kV من أجل دخل للإشارة مقداره 59.2mJ ويستمر المضخم بالعمل، حيث تزداد طاقة خرجه حتى نحصل على طاقة مقدارها 233.6mJ ،عند جهد ضخ المضخم 1kV.



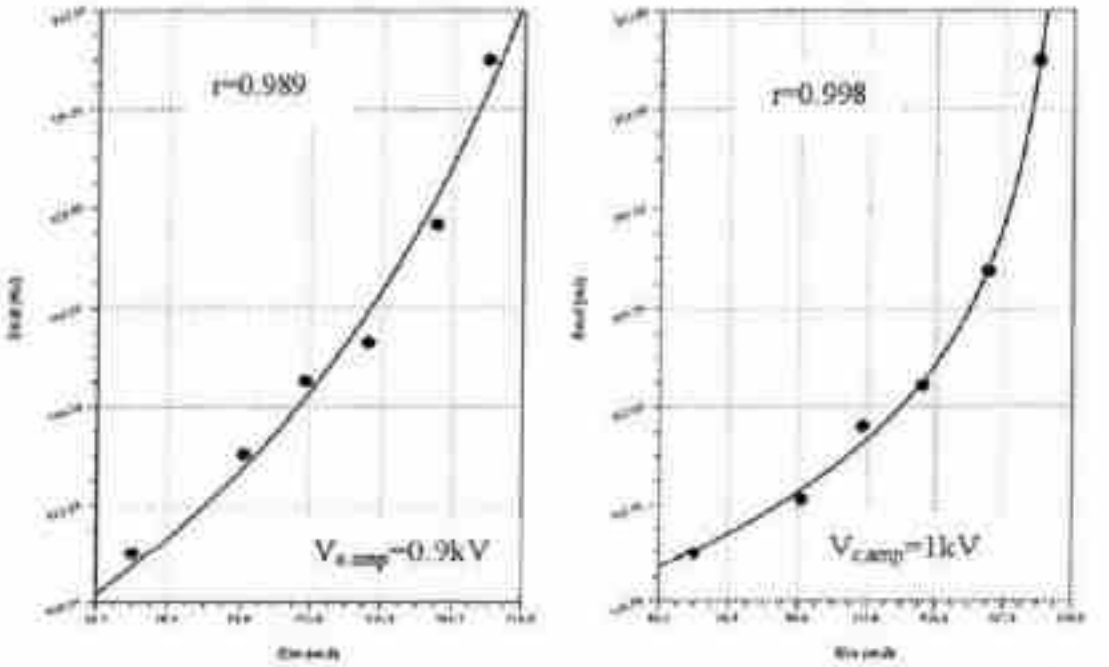
الشكل(4):تغيرات طاقة خرج المضخم بدلالة جهد ضخ المضخم عند قيم مختلفة لطاقة نبضة دخل المضخم.

وفقاً للنتائج الحاصلة، جرى اختيار قيمتين لجهد ضخ المضخم على سبيل المثال، ودرست تغيرات طاقة خرج المضخم بدلالة طاقة دخله، وهما 0.9kV و 1kV.

الجدول(2): تغيرات طاقة خرج المضخم بدلالة طاقة الدخل عند جهدي ضخ للمضخم هما $V_{c.amp}$=1kV و $V_{c.amp}$=0.9kV.

$V_{c.amp}$ (kV)	$V_{c.ocs}$ kV	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1
	$E_{amp.in}$ mJ	59.2	92.8	112	131.2	152	168
0.9	$E_{amp.out}$ mJ	118.4	136	148.8	155.6	176	204.8
1	$E_{amp.out}$ mJ	142.4	156.8	169.6	176.8	196.8	233.6

يُبين الشكل (5) تغيرات طاقة خرج المضخم بدلالة طاقة دخله عند قيمتين لجهد المضخم هما 0.9 kV و1kV. حيث تُبين عملية حساب ربح المضخم أنه يساوي G=1.13 من أجل $V_{c.amp}$=0.9kV ويساوي G=1.43 من أجل $V_{c.amp}$=1kV. ويُعطي الشكل الناتج شكل التابع الأسي أي هنالك زيادة أسية في ربح المضخم، حيث يعمل المضخم في النظام الأسي، بسبب أن طاقة نبضة الدخل صغيرة بالمقارنة مع طاقة الإشباع.



الشكل(5):تغيرات طاقة خرج المضخم بدلالة طاقة دخله عند قيمتين لجهد ضخ المضخم هما 1kV و 0.9kV .

دراسة تحليلية:[2]

1- تغيرات الطاقة المختزنة F_{stored} بدلالة طاقة خرج المضخم من أجل دخل ثابت للنبضة:

من أجل جهد ضخ للهزاز $V_{c.osc}$=0.9kV حيث $V_{osc.out}$=650 mV وبالتالي

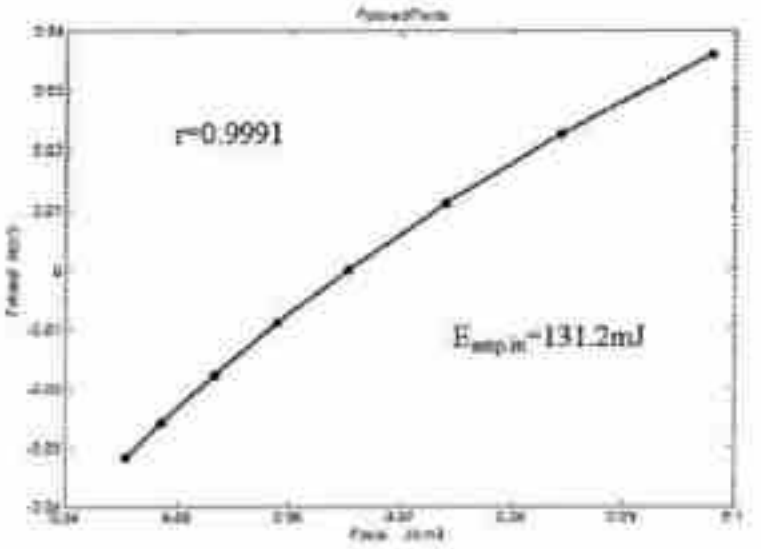
$$E_{osc.out}=E_{amp.in}=131.2mJ$$

يُبين الجدول (3) نتائج الحسابات النظرية باستخدام هذه القيم للمتغيرات.

الجدول(3): تغيرات F_{sto},G_0,g_0,η بتغير جهد الضخ للمضخم $V_{c.amp}$ من أجل $E_{amp.in}$=131.2mJ

$V_{c.amp}$ kV	0	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
$V_{amp.out}$ mV	456	488	536	592	656	744	848	984
$E_{amp.out}$ mJ	91.2	97.6	107.2	118.4	131.2	148.8	169.6	196.8
G_0	0.684	0.734	0.808	0.894	1	1.141	1.311	1.537
g_0 cm^{-1}	-	-	-	-	-	0.016	0.034	0.054
n_0x10^{16}1/cm^3	-	-	-	-	-	0.591	1.211	1.921
F_{sto} J/cm^2	-	-	-	-	-	0.0111	0.022	0.036
η %	-	-	-	-	-	0.99	1.06	1.14

[2] تمت كل الحسابات اللاحقة باستخدام برنامج الـ Matlab وبتطبيق القيم التجريبية الواردة أنفاً.



الشكل (6): تغيرات الطاقة المختزنة F_{stored} بتغير طاقة خرج المضخم من أجل دخل ثابت للنبضة.

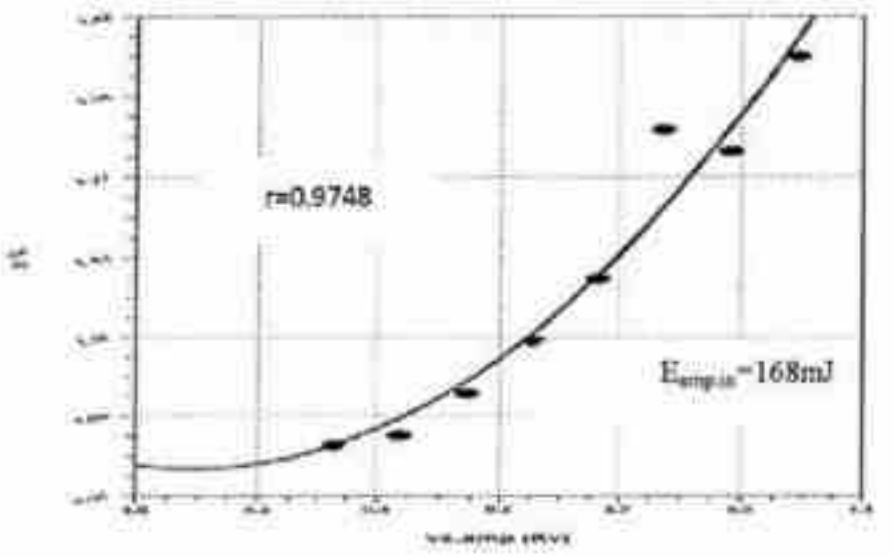
2- تغيرات كفاءة الانتزاع η مقابل تغير جهد الضخ للمضخم $V_{c.amp}$ من أجل دخل ثابت للنبضة.

من أجل جهد ضخ للهزاز: $V_{c.osc}$=1kV و $V_{osc.out}$=840 mV وبالتالي:

$E_{osc.out}=E_{amp.in}$=168mJ

الجدول(4): تغيرات η بتغير جهد الضخ للمضخم $V_{c.amp}$ من أجل $E_{amp.in}$=168mJ.

$V_{c.amp}$ kV	0	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
$E_{amp.out}$ mJ	116.8	120	126.4	132.8	145.6	161.6	180.8	204.8	233.6
g_0 cm^{-2}	-	-	-	-	-	-	0.009	0.026	0.044
η %	1	1.01	1.02	1.06	1.11	1.17	1.31	1.29	1.38



الشكل (7): تغيرات كفاءة الانتزاع η مقابل تغير جهد الضخ للمضخم $V_{c.amp}$ من أجل دخل ثابت للنبضة.

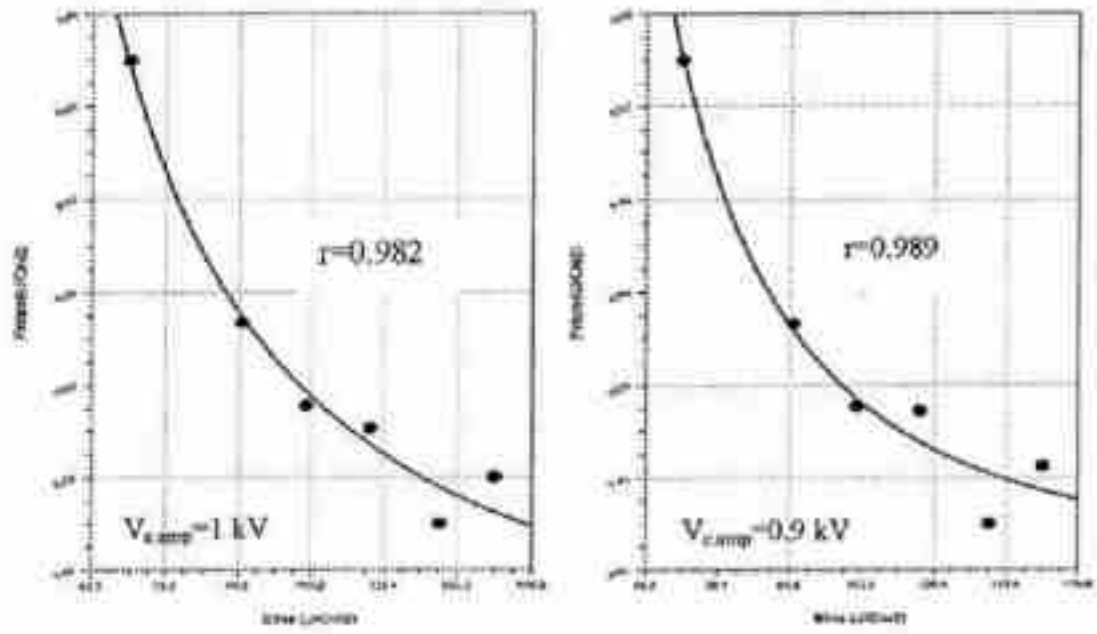
3- دراسة تغيرات الطاقة المختزنة مع طاقة نبضة الدخل من أجل جهد ثابت لضخ المضخم:

يُبين الجدول (5) تغيرات F_{stored} بدلالة E_{in} عند قيمتين لجهد ضخ المضخم 1kV و0.9kV، حيث نلاحظ تناقص الطاقة المختزنة بزيادة طاقة دخل النبضة.

الجدول (5): تغيرات F_{stored} بدلالة E_{in}

$V_{c.amp}$ / kV	E_{in} mJ	59.2	92.8	112	131.2	152	168
1	F_{stored} J/cm²	0.0758	0.0458	0.0364	0.0359	0.023	0.0296
0.9	F_{stored} J/cm²	0.0594	0.0332	0.0249	0.0226	0.013	0.0177

كان نصف قطر القضيب r=0.8cm ، وطول القضيب L=8cm . انظر الشكل (8)



الشكل (8): تغيرات الطاقة المختزنة مع طاقة نبضة الدخل من أجل قيمتين لجهد الضخ المضخم 0.9kV,1kV.

❖ استنتاجات :

- للتضخيم أهمية كبيرة في عمل منظومات الليزر ذات الطاقة العالية، وذلك للحصول على نبضة بطاقة عالية والمحافظة على مواصفات الحزمة وخصوصاً عند الحاجة لتوليد نبضات قصيرة جدا وأحادية اللون.
- دلت الدراسة النظرية لعملية التضخيم من مرحلة واحدة لليزر Nd:YAG النبضي، أن المضخم يملك نفس العمليات الفيزيائية للهزاز و الوسط نفسه وطريقة الضخ نفسه ولكن لا يمتلك مرايا.
- حسبنا تحليلياً كل من G_0, g_0,n_0,f_{so},η_L للمضخم المدروس من أجل قيم مختلفة لجهد الضخ المضخم من أجل قيمة ثابتة لطاقة نبضة الدخل.
- جرى حساب كفاءة الانتزاع عند قيم مختلفة لجهد ضخ المضخم مع بقاء الدخل ثابت للمضخم.
- دُرست تغيرات الطاقة المختزنة مع طاقة نبضة الدخل من أجل قيمتين لجهد الضخ المضخم 0.9kV,1kV.

- تُبين النتائج أن المضخم يعمل في مجال الربح، حيث كانت طاقة الاشباع أكبر بكثير من طاقة الدخل، وأن المضخم يعمل على تضخيم الإشارة في المجال الأسي.

❖ التوصيات:

1. يعتبر نظام هزاز - مضخم بمرحلة واحدة دراسة تمهيدية لتوسيع النظام من أجل مرحلتين أو أكثر من مراحل التضخيم.
2. يجب تحسين دارة التزامن بين الهزاز والمضخم في جملة هزاز – مضخم، وتطويرها لتصبح موائمة للأنظمة التي تعتمد على التضخيم من مرحلتين أو أكثر.
3. اعتماد طرق تبريد لنظام هزاز مضخم أفضل من الطريقة المستخدمة(الماء) في هذا البحث لتخفيض درجة الحرارة وتجنب الاجهادات الحرارية.
4. استخدام منظومة تضخيم تسمح بتغيير طول وقطر القضيب وكثافة تركيز Nd^{+3} لمعرفة تأثير تلك المتغيرات في عملية التضخيم.

❖ المراجع:

- FERMANN M , GALVANAUSKAS A , SUCHA G.,2003- **Ultrafast Lasers Technology and Applications**. Marcel Dekker, Inc,USA,797P.
- Frantz L, Nodvik J.,1963-**Theory of pulse propagation in a laser amplifier**., Journal of Applied physics 34:2346-9.
- KOECHNER W., 2006- **Solid State Laser Engineering**. 6th ed. , Springer Science+ Business Media ,Inc, USA,747p.
- MENZEL R., 2007- **Photonics Linear and Nonlinear Interactions of Laser Light and Matter.** 2ed ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg ,USA, 1024p.
- SILFVAST W., 2004- **Laser Fundamentals**. 2nd ed., William T. Silfvast 2004,642p.
- SVELTO O.,1998 - **Principles of Lasers** . 5th ed., Springer Science+ Business Media, London,620p.
- XINJU L., 2010- **Laser Technology**.2nil ed., Science CRC Press Taylor & Francis Group, USA,410p.

Analytical study of MOPA Amplifier of pulsed Nd:YAG laser

***Dr. ELJGAMY ESAM**
****Altaleb Khaled**
* Physics Dept, Faculty of Science, University of Damascus.
** Physics Dept, Faculty of Science, University of Al-Furat.

Abstract:

This Work describes the basic phenomena involved in The theory of the Pulse Amplification. We will discuss the laser amplifier for pulsed Nd:YAG laser, and experimental study of single stage amplification of pulsed Nd:YAG laser, including a **master-oscillator power amplifier (MOPA)** concept.

We will express: pulse amplification, physical operations happening into the amplifier and equations which help us to calculate the variation of the intensity of photon flow and inverted population of the incident pulse signal entering the amplifier at any position x at any time t as well as the energy of the output pulse and the amplifier's gain. We will study relation of the output energy with pumping at constant signal input for MOPA amplifier, and relation of the output energy with input energy at constant pumping voltage, then we calculate and study relation of the gain of this amplifier with saturation fluence F_{sat}, stored energy F_{sto}, small-signal gain coefficient g_0 and extraction efficiency η_E,...etc.

KEYWORDS:

Master - oscillator power amplifier (MOPA), Pulse amplification, photon flow, pumping, output energy.