# ربح الطاقة لمضخم MOPA في ليزر Nd:YAG النبضي

# Energy Gain for MOPA Amplifier in Pulsed Nd:YAG Laser

**الجغامي عصام *، صائم الدهر مصطفى**،الطالب خالد *****

* قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة دمشق

** قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة دمشق

***طالب دراسات عليا (ماجستير) قسم الفيزياء، المعهد العالي لبحوث الليزر وتطبيقاته(HILRA)، جامعة دمشق ***

❖ **الملخص:**

في هذا البحث ندرس ظاهرة أساسية في الليزرات الصلبة تتضمن نظرية تضخيم النبضة، حيث نعطي وصف لمضخم ليزر Nd:YAG النبضي، وندرس تجريبيا التضخيم من مرحلة واحدة في ليزر Nd:YAG النبضي الذي يسمى مفهوم(MOPA) مضخم استطاعة هزاز - رئيسي. سنصف بشكل مفصل تضخيم النبضة والمعادلات التي نحسب من خلالها كثافة الإسكان المعكوس وشدة جريان الفوتون وبالتالي لاحقا نحسب طاقة الخرج للمضخم والربح الناتج عن عملية التضخيم. وكذلك قمنا بدراسة تغيرات طاقة نبضة الخرج مع قيم مختلفة لجهد الضخ من أجل دخل ثابت للإشارة، وكذلك تغيرات خرج المضخم مع الدخل من أجل قيم جهد ضخ مختلفة للمضخم، وحسبنا الربح الناتج عن عملية التضخيم للنظام المدروس.

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

❖ مقدمة :

تُعتبر عملية تضخيم ضوء الليزر من العمليات الهامة والضرورية للحصول على استطاعات خرج ونبضات ذات طاقة عالية جداً، حيث إن الهزاز يحدّ من سطوع (Brightness) الأشعة الليزرية الصادرة منه، وخصوصاً عند الحاجة لتوليد نبضات قصيرة جداً وأحادية اللون. ومن خلال عملية التضخيم يمكننا الحصول على استطاعات ذروة في مجال البيكوواط واستطاعات خرج متوسطة من 100wإلى 10kw وطاقات من 10j إلى 100j بجودة إشعاع محدودة الانعراج. يتكون المضخم من مادة فعالة والتي تُضخ كما في الهزاز، ولكن لا يوجد مرنان يختار خصائص الضوء. حيث تحدد هذه الخصائص بواسطة الضوء الصادر من هزاز الليزر. أما طريقة ضخ المادة الفعالة فتكون مشابهة لطرق ضخ الهزاز. [2]

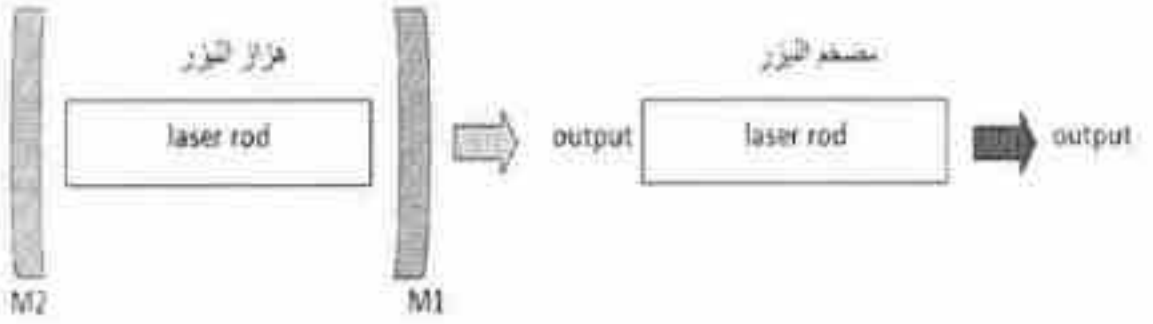
وبالتالي لزيادة شدة الحزمة نحتاج لاستخدام مضخمات إضافية، توضع في المواقع الخلفية وعلى خط الخرج لليزر، والتي تقوم بإضافة المزيد من الفوتونات (أي فوتونات إضافية للشعاع في تطابق مع شعاع الدخل). أن الإصدار المحرض يحدث في نفس اتجاه الفوتونات المحرضة، حيث يكون للمضخم وسط الربح نفسه الذي ينتج منه شعاع الدخل. [4]

يمكن من خلال عملية التضخيم زيادة الطاقة والاستطاعة الناتجة من الهزاز بخصائص طيفية وزمانية ومكانية معينة عن طريق إضافة مرحلة تضخيم واحدة أو أكثر إلى نظام الليزر. حيث أن الوظيفة الأساسية للمضخم هي زيادة سطوع الحزمة الليزرية. يمكن تحقيق تضخيم النبضة أو استطاعة حزمة الليزر المستمر الناتجة عن الهزاز باستعمال تقنيات متعددة، منها استطاعة هزاز- رئيسي (MOPA)، وهو محور بحثنا. [1,7]

❖ النظرية :

١) انطلاقة سريعة في مضخم MOPA :

يعتبر ترتيب(هزاز- مضخم) ابسط نوع من أنواع المضخمات الليزرية،عندما تكون الطاقة المنتجة بواسطة هزاز الليزر غير كافية لأجل تطبيق معين، نضع خلف الهزاز مضخم فيصبح الخرج هو دخل للمضخم الشكل(1). هذا الترتيب يدعى (هزاز-مضخم) أو 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، لكن عبور وحيد للإشارة كاف لاستنزاف أغلب أو كل الإسكان المعكوس للمضخم. هناك أفضلية إلى حد ما في استعمال ترتيب هزاز- مضخم أكثر من استخدام مبسط لهزاز أكبر. وذلك لأن استخدام هزاز كبير سينتج كفاءة حزمة أقل من الهزاز الصغير، حيث سيحدث تشوهات حرارية ومشاكل ضوئية أخرى. مع الإشارة إلى أن المضخم في هذا النوع يملك كل الخصائص الطيفية الزمانية والمكانية للهزاز، ولكن طاقته أعلى من التي ينتجها الهزاز وحيد.[3]

يعتمد أسلوب اختيار مضخم معين على مستوى الطاقة والخصائص الزمنية والطيفية لإشارة الدخل بالإضافة إلى طاقة أو استطاعة الخرج المطلوبة. من اجل

انتزاع فعال للطاقة من مضخم النبضة، بحيث تقترب كثافة الطاقة لإشارة الدخل من كثافة الإشباع لمادة الليزر المستخدمة.

عند تصميم مضخمات الليزر يجب إن نأخذ الخواص التالية بعين الاعتبار:

١- الطاقة أو الربح المستخلص. عند تصميم المضخم، يحدث استبدال بين الطاقة أو الربح العالي المنجز.
٢- التغذية العكسية التي يمكن أن تؤدي إلى تذبذبات طفيلية (تشوهات).
٣- تشوه السطح، حيث إن الطاقة أو القوة المفرطة المسلطة على العناصر البصرية المختلفة في المضخم يمكن أن تقود إلى أضرار بصرية.
٤- تشوهات النبضة وصدر الموجة التي يقدمها المضخم.[1]

إن الطاقة العالية المطلوبة لليزر صعبة التحقيق باستخدام الهزاز فقط. ولذلك نحتاج لزيادة هذه طاقة أو استطاعة الخرج لليزر. حيث تختلف دلائل الليزر مثل (زاوية انعراج حزمة الضوء، وحدانية اللون، طول النبضة، أداء التعديل..). لذا يجب المحافظة على الخصائص المميزة لحزمة الليزر، بحيث لا يمكن الحصول على ذلك بزيادة الطول ولا قطر المادة الفعالة. علاوة على ذلك، فأن حزمة الليزر ستجتاز الوسط الفعال ذهابا وإيابا عدد من المرات. حيث الاستطاعة أو الطاقة ستكون عالية جداً ويمكن أن يحصل تهشم في الوسط الفعال. باستعمال تقنية Q-switch أو قفل النمط (Mode-Locking)، نحصل على استطاعة ذروة عالية للغاية تتراوح بين ($10^{12}$w - $10^{9}$w). حيث تكون استطاعة الذروة عالية للغاية لان الطاقة تصدر في لحظة قصيرة جداً. ولكن في الحقيقة طاقة الخرج بواسطة مثل هذا الهزاز باستطاعة الذروة العالية لا تكون بالضرورة كبيرة جداً. لذا، أفضل طريقة للحصول على ليزر طاقة عالية بأداء ممتاز هي تطبيق تقنية تضخيم الضوء.

يعتمد مضخم الليزر والهزاز على العمليات الفيزيائية نفسها (تضخيم الضوء بالإصدار المحثوث)، ويكمن الاختلاف الأساسي في غياب المجاوب في

حالة مضخم الليزر. حيث تكون المادة الفعالة في حالة انقلاب إسكاني بسبب عملية الضخ. تعبر النبضة الضوئية المولدة من الهزاز المادة الفعالة للمضخم في مـــرور وحيد للإشارة.

يتولد الإشعاع المحثوث القوي بواسطة الجسيمات المثـــارة تحـــت فعـــل الإثـــارة الضوئية الواردة، ويكون مطابقاً للإشارة الضوئية الواردة. وبالتالي سيضـــخم مثـــل هذا الإشعاع. ويكون المضخم الآن قادر على إخراج حزمة الضوء بسطوع قـــوي وأكبر من شعاع الليزر الأصلي. حيث يحتاج مضخم الليزر لمادة فعالة تملك أسكان معكوس كاف لضمان كسب الربح ليكون أعلى من الخسائر كلها لوسط المضـــخم، تسمى هذه التقنية تضخيم الموجـــة المســـافرة (Traveling Wave) أو مضـــخم استطاعة هزاز - رئيسي.

تملك دراسة تقنية تضخيم الموجة المسافرة أو مضخم استطاعة هزاز - رئيسي (MOPA) الفوائد التالية :

- أولا: تعبر حزمة الليزر وسط التضخيم في عبور وحيد، حيث تزداد عتبـــة ضرر الوسط كثيراً، هذا يكون تحت شرط لكثافات استطاعة خرج متماثلة، حيث لا يتهشم بسهولة وسط تشغيل المضخم.
- ثانيا: عندما نحتاج لليزر طاقة عالية. نعتمد تقنية تضخيم الموجة المسافرة بمراحل متعددة، المضخم يوسع الفتحة وتُقصّر طول مادة التشغيل عند كل مرحلة، لمنع التخريب الناتج عن الإشعاع الخارق والتمركز الذاتي.
- ثالثا: في نظام هزاز - مضخم. يمكن تحديد عرض النبضة وطـــول الخـــط الطيفي وزاوية انعراج حزمة الضوء من الهزاز، بينما المضخم يحدد طاقة أو استطاعة خرج الليزر. لذا بدمج مضخم ثاني نحصل علـــى خصـــائص لحزمة ليزر جيدة ونزيد إلى درجة كبيرة من سطوع خرج الليزر. [4,5]

**٢) معادلات لمضخم النبضة(The Equation of the Pulse Amplifier):**

بفرض أن طول المادة الفعالة لمضخم الليزر L، أن نبضة الإشارة الضوئية تحقن داخل المادة الفعالة باتجاه x، كما في الشكل(2). الإشارة الضوئية تكون مضخمة بانتظام أثناء سفرها حيث تستهلك الإسكان المعكوس بانتظام. كل من عدد الفوتونات والإسكان المعكوس بواحدة الحجم سكون تابع للزمن t والمكان x ويرمز لهما على التوالي Ø (x,t) و Δn(x,t).

للتبسيط نفرض إن الإسكان المعكوس في المقطع العرضي المادة الفعالة للمضخم موزع بانتظام وبإهمال تأثير عرض الخط الطيفي ونمط الخط بالإضافة إلى الضخ الضوئي والإشعاع الامتصاصي على عكس الإسكان. حيث تعطى معادلات معدل تغير كثافة الإسكان المعكوس لنظام ثلاث وأربع سويات طاقة بالشكل:

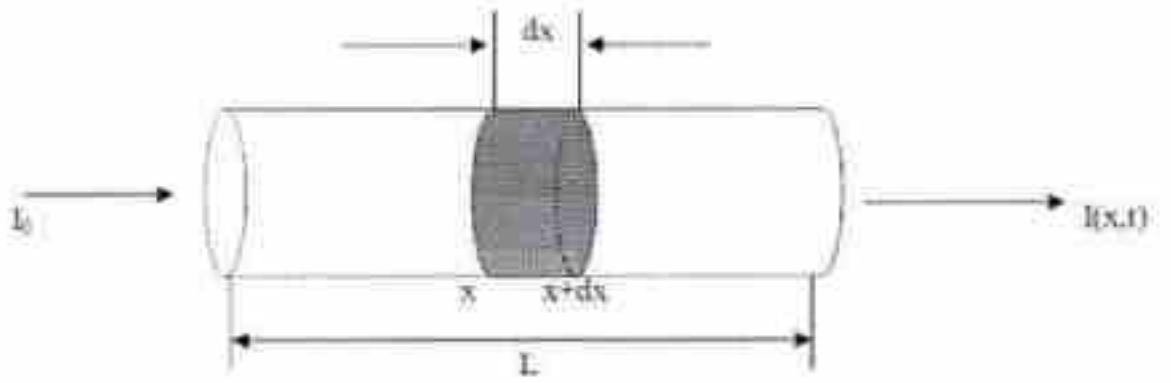
- نظام مضخم ليزر ثلاث سويات:

$$\frac{\partial \Delta n(x,t)}{\partial t} = -2\sigma \Delta n(x,t) I(x,t) \qquad (1)$$

- نظام مضخم ليزر أربع سويات:

$$\frac{\partial \Delta n(x,t)}{\partial t} = -\sigma \Delta n(x,t) I(x,t) \qquad (2)$$

سيتغير عدد الفوتونات في المادة الفعالة مع عنصر الحجم ( x→x+dx). هذا التغير في عدد الفوتونات يكون لسببين:




الشكل(2): مخطط لقضيب Nd:YAG بطول L المستخدم في MOPA.

الأول: بسبب الإشعاع المحثوث ضمن الزمن dt، عدد الفوتونات المولـــدة فـــي dx يكون بالشكل: $\sigma c\emptyset(x,t)\Delta n(x,t)dxdt$ .

الثاني: ضمن زمن dt، عدد الفوتونات الداخلة لعنصر الحجم x يكون $\emptyset(x,t)c.dt$ ، وعدد الفوتونات المتدفق من x+dx يكون $\emptyset(x+dx,t)c.dt$.

لذلك عدد الفوتونات الصافي الداخلة لعنصر الحجم x ضمن زمن dt يكون $c.dt\ [\emptyset(x,t) - \emptyset(x+dx,t)]$. نفترض أن كل هذه الخسائر للمضخم مهملة. حيث معدل التغير في عنصر الحجم داخل الزمن dt يجب أن يكون المجموع الجبري لعدد الفوتونات المولدة بالإشعاع المحثوث وعدد الفوتونات الصافي الداخل لعنصر الحجم أي بالشكل:

$$\frac{\partial\emptyset(x,t)}{\partial t}dxdt = [\emptyset(x,t) - \emptyset(x+dx,t)cdt + \sigma c\emptyset(x,t)\Delta n(x,t)dxdt \quad (3)$$

نعبر عن معدل تغير كثافة عدد الفوتونات بمعادلة تفاضلية جزئية :

$$\frac{\partial\emptyset(x,t)}{\partial t} + c\frac{\partial\emptyset(x,t)}{\partial x} = \sigma c\emptyset(x,t)\Delta n(x,t) \quad (4)$$

وعدد الفوتونات المتدفق عبر واحدة المقطع العرضي ضمن واحدة الـــزمن يســـمى تدفق الفوتون ويرمز له $I(x,t)$. حيث يعطى بالشكل $I(x,t) = C.\emptyset(x,t)$

وبالتالي المعادلة التي تصف معدل تغير شدة جريان الفوتون تكون:

$$\left\{\frac{\partial I(x,t)}{\partial x}+\frac{1}{c}\frac{\partial I(x,t)}{\partial t}\right\}=\sigma\Delta n(x,t)I(x,t) \qquad (5)$$

أن معادلة معدل تغير شدة جريان الفوتون تكون ذاتها من أجل ثلاث أو أربع سويات طاقة بالإضافة لمعادلات تغير كثافة الإسكان (1) و (2) هي معادلات أساسية لمضخمات الليزر.

نفرض أن شدة جريان الفوتون البدائية لإشارة الدخل لتكون $I_0(t)$، تدخل مادة التشغيل عند x=0. أيضاً نفرض قبل دخول الإشارة إلى المضخم، الإسكان المعكوس البدائي لمادة التشغيل تكون $\Delta n_0(x)$ ، حيث الشروط الحدية لمعادلة المعدل تكون:

$$I(0,t)=I0(t) \qquad (at \quad x=0)$$

$$\Delta n(x,t<0)=\Delta n_0(x) \qquad (at \quad 0<x<L)$$

المعادلات التفاضلية (1) و (5)، هي مجموعة معادلات تفاضلية جزئية لا خطية. هنا نستخدم طريقة التفريق ( فصل المتغيرات) لحل هذه المعادلتين بدون أخذ خسارة وسط التضخيم بعين الاعتبار، يمكننا حساب شدة جريان الفوتون والإسكان المعكوس لإشارة النبضة الساقطة والتي تدخل للمضخم عند أي موضع x عند أي لحظة (t)، بالإضافة لطاقة نبضة الخرج وربح المضخم كما سنرى لاحقا. [5]

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

في هذا الفقرة ندرس حلول معادلة المعدل للمضخم الليزر. كما ذكرنا سابقا من فرضيات، نفرض أن الموجة المستوية بالشدة الموحدة $I_0$ تدخل عند $x=0$ مضخم الليزر بطول $L$ للمضخم باتجاه x. نحدد اعتبارانتا لهذه الحالة حيث حزمة الليزر القادمة تكون على شكل نبضة (تضخيم نبضي)، لنعتبر أولا أن وسط تضخيم يعمل في نظام أربع سويات طاقة، لذلك نعتبر أن زمن النبضة $\tau_p$ حيث يكون $\tau_1 << \tau_p << \tau$، حيث $\tau_1$ و$\tau$ عمر حياة سويات الليزر العليا والدنيا لوسط

التضخيم على التوالي. في هذه الحالة إمكان السوية الدنيا للمضخم يمكن أن يوضع مساوي للصفر. في حالة تضخيم نبضات ليزر Q-Swithed من ليزر Nd:YAG. نفرض أيضاً أن الضخ للمستوي المضخم الأعلى واضمحلال التلقائي اللاحق يكون مهمل خلال عبور النبضة وحيث الانتقال يكون موسع بشكل متجانس.

لقد قام كل من فرنتز (Frantz) ونودفيك (Nodvik) في عام1963[8]، بإيجاد الحلول التحليلية للمعادلة (2) و(5). فمن أجل المعادلة (2) معادلة تفاضلية جزئية حيث $\Delta n$ يكون تابع لـ x, t بسبب حقيقة أن I=I(x,t).

نجد الحل لأجل n(x,t):

$$\Delta n(\infty) = \Delta n = \Delta n_0 \exp\left\{-\left(\frac{\sigma}{h\nu}\int_{-\infty}^{t} I\,dt\right)\right\} \qquad (6)$$

حيث $\Delta n_0=\Delta n(-\infty)$ يكون الانقلاب قبل وصول الحزمة المحدد في تعبير معامل ربح الإشارة الصغيرة $g_0=\sigma.\Delta n$ بالتالي شدة طاقة النبضة F (طاقة لكل واحدة المساحة) تعطى بالعلاقة حتى زمن t.

$$F(x) = \int_{-\infty}^{t} I(x,t)dt$$

نعرف شدة طاقة الإشباع $F_{sat}$ بالشكل:

$$F_{sat} = \frac{h\nu}{\sigma}$$

بإعادة كتابة المعادلة (6) بالشكل:

$$\Delta n = \Delta n_0 \exp\left\{-\left(\frac{F}{F_{sat}}\right)\right\}$$

وبما أن معامل الربح $g_0 = \sigma\Delta n$ بالتعويض نجد:

$$g_0 = \sigma\Delta n_0 \exp\left\{-\left(\frac{F}{F_{sat}}\right)\right\} \qquad (7)$$

عندما تتكاثر النبضات عبر وسط الربح، سيحدث الإشباع عندما $F=F_{sat}$ ولذلك يتناقص الربح بـــ $1/e$. باستخدام الشروط البدائية وحدود مناسبة حيث $\Delta n(0,x)=\Delta n_0$ و $I_0(t)=I(t,0)$.

$n_0$ إسكان سوية الليزر العليا للمضخم قبل وصول النبضة، $I_0(t)$ شدة نبضة الدخل للمضخم، بالتالي حل المعادلة (5) و(2) سيكون:

$$I(x,t) = \frac{I_0(t-\frac{x}{c})}{1-[1-\exp(-gx)\exp[-\frac{2\sigma}{h\nu}\int_{-\infty}^{t-x/c} I_0(t')dt']]} \qquad (8)$$

حيث $g=\sigma.\Delta n_0$ معامل الربح غير المشبع للمضخم. من المعادلات التفاضلية (2) و(5) حصلنا لأجل الشدة الكلية للنبضة $F(x)$ .

$$F(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(x,t)dt$$

بإجراء التكامل المعادلة(2) المتعلقة بالزمن من $t=-\infty$ إلى $t=+\infty$ نجد:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\Delta n\, I\, dt}{F_{sat}} = \Delta n_0 - \Delta n(+\infty) = \Delta n_0(1-\exp(-\frac{F}{F_{sat}}))$$

حيث $$\Delta n(\infty) = \Delta n_0 \exp(-\frac{F}{F_{sat}})$$

بأجراء التكامل في طرفي المعادلة (5) بالنسبة للزمن وفي نفس الفترة الزمنية حيث $I(+\infty,x)=I(-\infty,x)=0$ نجد

$$\frac{dF}{dx} = \sigma\int_{-\infty}^{+\infty}\Delta n\, I\, dt = \sigma\Delta n_0\int_{-\infty}^{+\infty}\exp\{-(\frac{F(t)}{F_{sat}})\}\, I\, dt$$

بما أن $I.dt = dF$ ، هذا يؤدي إن ربح شدة الطاقة للمضخم تكون:

$$\frac{dF}{dx} = g_0 F_{sat}\left[1 - e^{-\left(\frac{F}{F_{sat}}\right)}\right] - \alpha F \qquad (9)$$

لأجل طول وسط الربح L والحل لـ (9) لشدة طاقة الخرج F للمضخم بإهمال الامتصاص α.

$$F = F_{sat} \ln\left\{1 + G_0\left[e^{\left(\frac{F_0}{F_{sat}}\right)} - 1\right]\right\} \qquad (10)$$

بالقسمة على $F_0$ شدة طاقة الدخل نحصل على الربح $G = \frac{F}{F_0}$ تصبح المعادلة السابقة بالشكل:

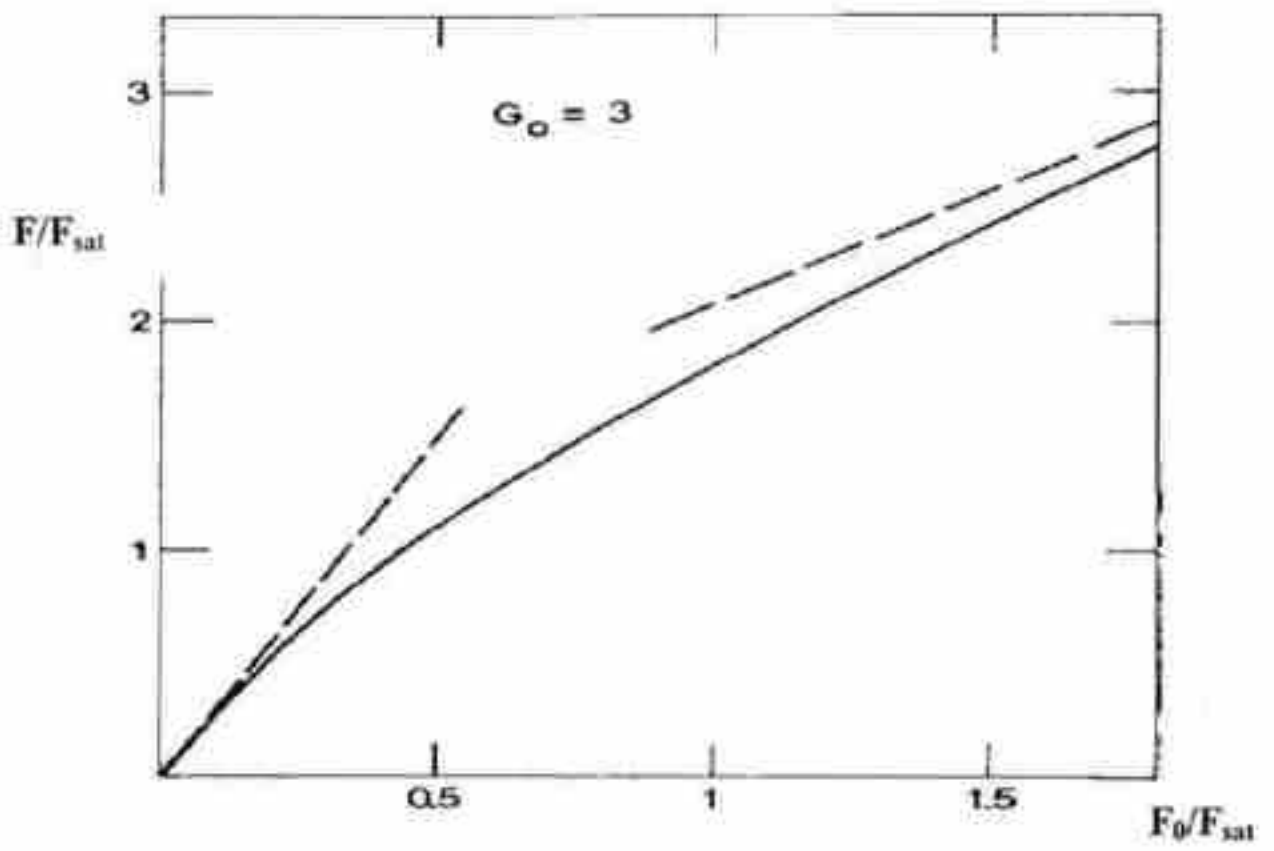
$$G = \frac{F_{sat}}{F_0} \ln\left\{1 + G_0\left[e^{\left(\frac{F_0}{F_{sat}}\right)} - 1\right]\right\} \qquad (11)$$

حيث $F_0$ يكون شدة طاقة الدخل، $G_0=\exp(g_0L)$ الربح الغير مشبع للمضخم.

١- عندما $1 << \frac{F_0}{F_{sat}}$ حيث يمكن تقريب المعادلة السابقة (10) إلى الشكل:

$$F = F_0 \exp(g\,L) \qquad (12)$$

حيث $G_0 = \exp(gL)$ الربح الغير المشبع للمضخم، $F_0$ شدة الطاقة لحزمة الدخل. وشدة الخرج تزداد خطيا مع شدة الدخل (نظام تضخيم الخطي في الشكل(3) التمثيلي للمعدل $\frac{F}{F_{sat}}$ بدلالة $\frac{F_0}{F_{sat}}$ لأجل $G_0 = 3$ ). ترسم المعادلة السابقة (12) كخط مستقيم ينطلق من المبدأ. عند شدات دخل أعلى، حيث F تزداد بزيادة $F_0$ عند معدل اقل من الناتج في المعادلة(12). ونقول انه بدأت عملية إشباع المضخم.




الشكل(3): شدة طاقة خرج الليزر F مقابل شدة طاقة الدخل $F_0$ للمضخم بمعامل ربح إشارة صغيرة $G_0$=3. شدة الطاقة إشباع الليزر $F_{sat} = h\nu/\sigma$.

٢- عندما شدة طاقة الدخل تكون عالية $\frac{F_0}{F_{sat}} >> 1$ ، إشباع المضخم يبدأ بالحدوث. لأجل $F_0 >> F_{sat}$ (نظام إشباع عميق) يمكن تقريب المعادلة (10) إلى الشكل:

$$F(L) = F_0 + g_0 L F_{sat} \qquad (13)$$

ترسم المعادلة السابقة (13) أيضا في الشكل(3) كخط مستقيم، وتدل العلاقة السابقة أنه عند شدة دخل عالية، تنمو شدة الطاقة خطياً مع الطول L للمضخم. أي شدة الخرج تكون متعلق خطياً بطول المضخم L.[1,4,6,7]

❖ **حسابات ونتائج :**

**١- دراسة تغيرات خرج المضخم مع جهد الضخ من أجل دخل ثابت للإشارة الصادرة من الهزاز:**

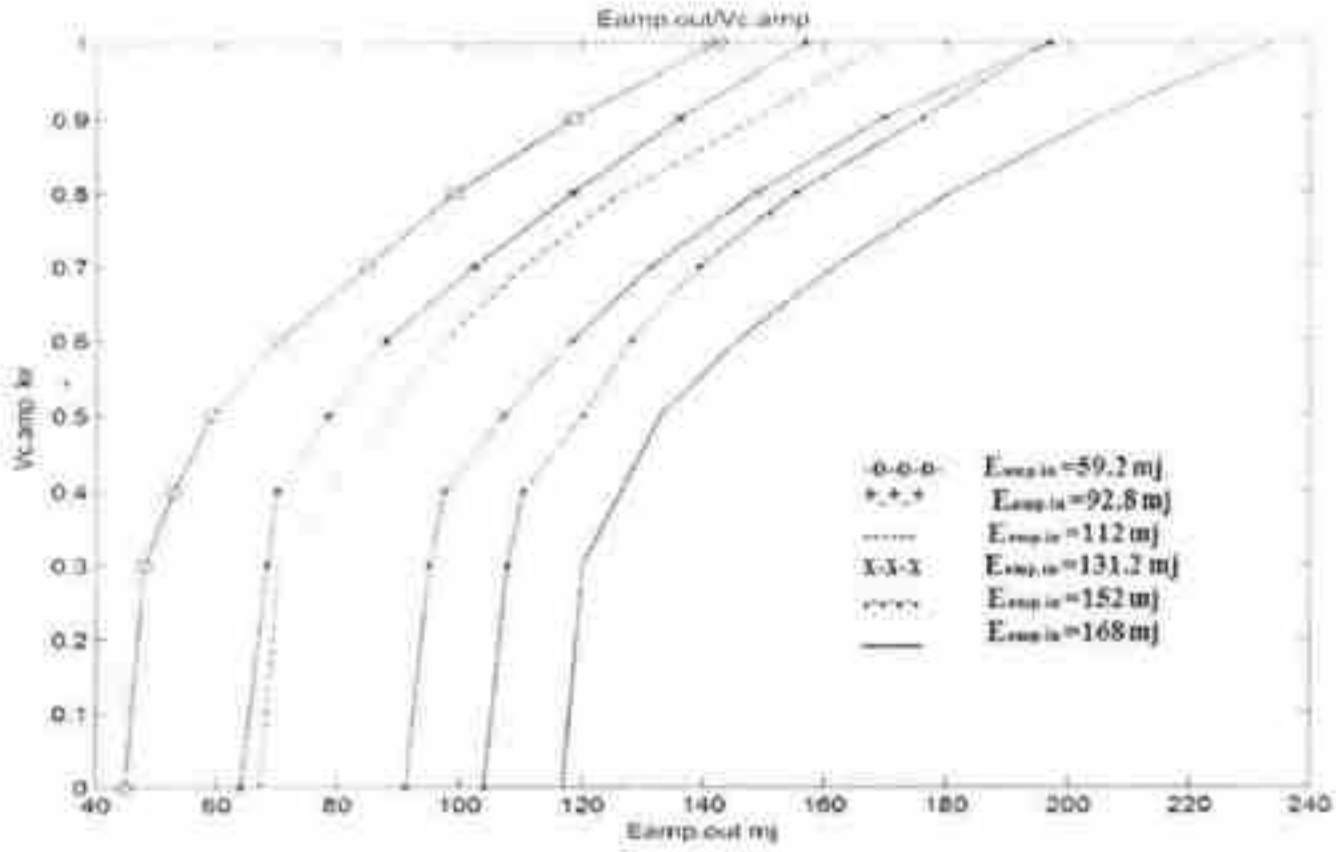
- نثبت دخل المضخم وذلك بتثبيت جهد الضخ للهزاز $V_{c.osc}$.
- نحصل على خرج هزاز (أي دخل مضخم) $V_{osc.out}$ على الحساس حيث يمكن باستخدام التحويل الحصول على طاقة النبضة.

$$Responsively=4.889\ V/J$$

- بقسمة القيمة على نسبة التحويل في الحساس نحصل على خرج هزاز الذي هو دخل للمضخم $E_{osc.out}=E_{amp.in}$.
- نأخذ قيم مختلفة لضخ المضخم $V_{c.amp}$ ونجري عملية القياس وندون النتائج في الجدول(1).

| $V_{c.osc}$ (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 |
| $V_{c.amp}$ (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 |

الجدول (1): قيم طاقات نبضة الخرج $E_{amp.out}$ بثبات جهد الضخ للمضخم $V_{c.amp}$ من أجل قيم مختلفة لطاقة نبضة الدخل $E_{amp.in}$.



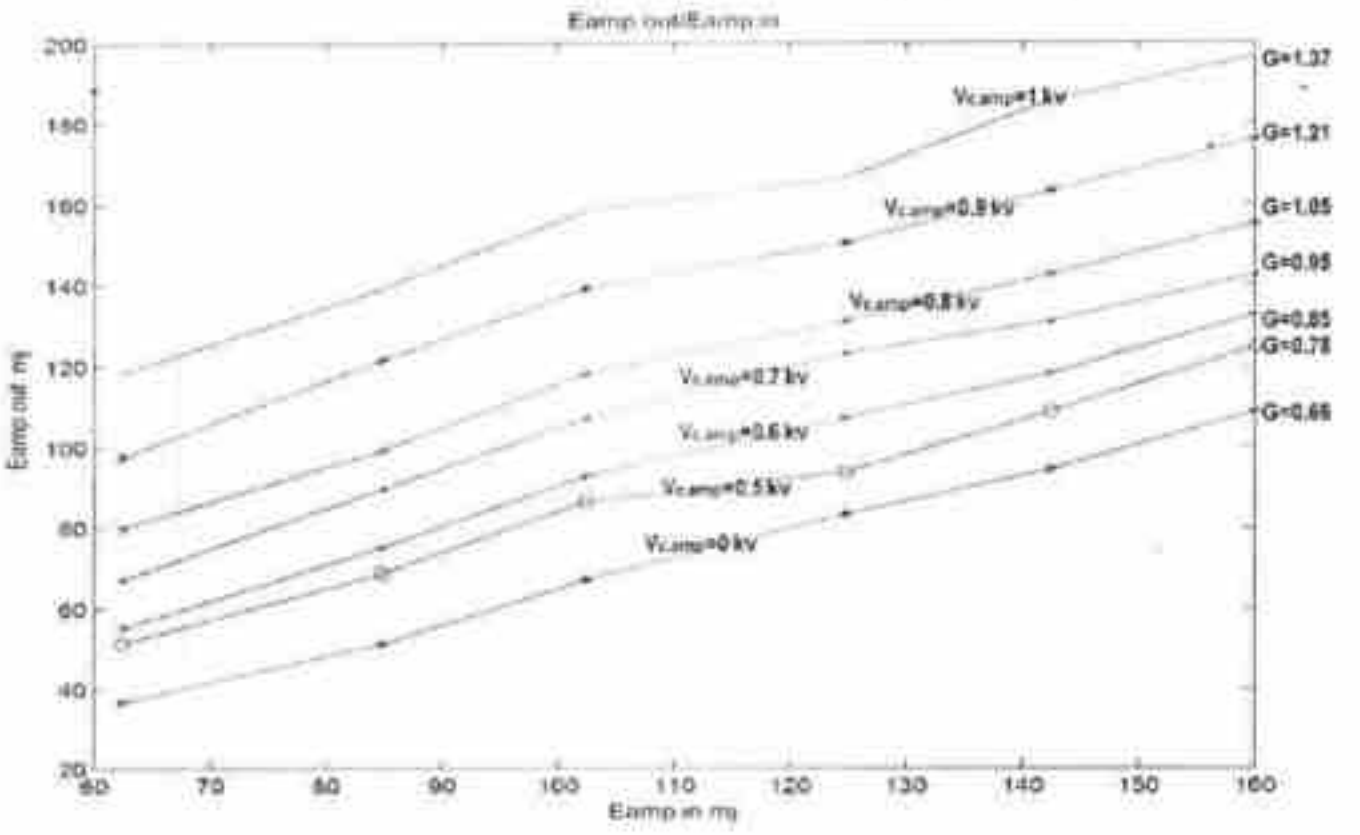

الشكل(4):تغيرات الخرج مع قيم مختلفة لضخ المضخم من أجل عدة قيم للدخل.

**٢- دراسة تغيرات خرج مع دخل المضخم من أجل جهد ضخ ثابت للمضخم**

- نثبت جهد الضخ للمضخم لأجل قيم مختلفة$V_{c.amp}$، الجدول (2).
- نثبت دخل المضخم (خرج الهزاز ) عند قيم مختلفة $E_{amp.in}$.
- نقيس خرج المضخم $E_{amp.out}$ من اجل كل قيم لـ $E_{amp.in}$ و $V_{c.amp}$.

| $V_{c.amp}$(kv) | | | 0 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $V_{c.osc}$ (kv) | $V_{osc.out}$ (mv) | $E_{amp.in}$ (mj) | $E_{amp.out}$ (mj) | | | | | | |
| 0.75 | 312 | 62.4 | 36.8 | 51.2 | 55.2 | 67.2 | 80 | 97.6 | 118.4 |
| 0.8 | 424 | 84.8 | 51.2 | 68.8 | 75.2 | 89.6 | 99.2 | 121.6 | 139.2 |
| 0.85 | 512 | 102.4 | 67.2 | 86.4 | 92.8 | 107.2 | 118.4 | 139.2 | 158.4 |
| 0.9 | 624 | 124.8 | 83.2 | 93.8 | 107.2 | 123.2 | 131.2 | 150.4 | 166.4 |
| 0.95 | 712 | 142.4 | 94.4 | 108.8 | 118.4 | 131.2 | 142.4 | 163.2 | 185.6 |
| 1 | 800 | 160 | 108.8 | 124.8 | 132.8 | 142.4 | 155.2 | 176 | 196.8 |

الجدول(2): قيم طاقات نبضة الخرج $E_{amp.out}$ مع دخل ثابت للمضخم $E_{amp.in}$ من أجل قيم مختلفة للضخ المضخم $V_{c.amp}$.




الشكل (5): تغيرات الخرج مع الدخل عند قيم ضخ مختلفة للمضخم $V_{c.amp}$.

## ❖ استنتاجات :

- للتضخيم أهمية كبيرة في عمل منظومات الليزر ذات الطاقة العاليـــة، وذلك للحصول على نبضة بطاقة عالية والمحافظة علـــى مواصـــفات الحزمة وخصوصا عند الحاجة لتوليد نبضات قصيرة جـــدا وأحاديـــة اللون.
- وجدنا في الدراسة النظرية لعملية التضخيم من مرحلة واحـــدة لليـــزر Nd:YAG النبضي، أن المضخم يملك نفس العمليات الفيزيائية للهزاز ونفس الوسط ونفس طريقة الضخ ولكن لا يوجد مرايا.

- قمنا بقياس خرج الليزر قبل وبعد عملية التضـــخيم لنظـــام هـــزاز - مضخم لليزر Nd:YAG النبضي، والربح الناتج عن التضخيم.
- أوجدنا طاقة الخرج الناتجة عن عملية التضخيم وعلاقتها مـــع ضـــخ المضخم وطاقة الدخل للإشارة الصادرة من الهزاز في نظام MOPA.

❖ **المراجع :**


[1] KOECHNER W., 2006- **Solid State Laser Engineering**. 6th ed. , Springer Science+ Business Media ,Inc, USA,747p.

[2] MENZEL R., 2007- **Photonics** Linear and Nonlinear Interactions of Laser Light and Matter. 2nd ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg,USA,1024p.

[3] Hitz B, Ewing J, Hecht J.,2001- **Introduction to Laser Technology**. 3st ed., IEEE press, USA,288p.

[4] SILFVAST W., 2004- **Laser Fundamentals**. 2nd ed., William T. Silfvast 2004,642p.

[5] XINJU L., 2010- **Laser Technology**.2nd ed., Science CRC Press Taylor & Francis Group, USA,410p.

[6] SVELTO O.,1998 - **Principles of Lasers** . 5th ed., Springer Science+ Business Media, London,620p.

[7] KOECHNER W., Bass M., 2003- **Solid-State Lasers.a Graduate Text**., Springer- Verlag New York, Inc, USA,409p.

[8] L.M. Frantz and J. S. Nodvik.,(1963)-**Theory of pulse propagation in a laser amplifier**.Journal of Applied physics 34:2346-9.

# Energy Gain for MOPA Amplifier in Pulsed Nd:YAG Laser

**ELJGamy A. *, ELdaher M. **, Altaleb Khaled *****
* Physics Dept, Faculty of Science, University of Damascus
** Physics Dept, Faculty of Science, University of Damascus
***Postgraduate Student (MSc) Dept. of Physics, HILRA, University of Damascus

## Abstract

This work is related to 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 anytime 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 the gain of this amplifier.

**KEYWORDS:**

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