

1.3.8. Физика конденсированного состояния  
1.3.8. Физикаи ҳолатҳои конденсӣ  
1.3.8. Physics of condensed state

УДК 621.373.826  
ББК 32.86.-5-01

**СИНХРОНИЗАЦИЯ НЕСКОЛЬКИХ  
ГРУПП ПРОДОЛЬНЫХ МОД  
НЕПРЕРЫВНОГО ЛАЗЕРА**

*Халимджон Гафуров - кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики и твердого тела ГОУ "ХГУ имени академика Бободжона Гафурова", e-mail: [microwavetgu@gmail.com](mailto:microwavetgu@gmail.com)*

**СИНХРОНИЗАТСИЯИ ЯҚЧАНД  
ГУРУҲИ МОДҲИ ТҶЛОНИИ ЛАЗЕРИ  
БЕФОСИЛА**

*Халимҷон Гафуров - номзади илмҳои физикаю математика, дотсенти кафедраи физикаи умумӣ ва ҷисмҳои сахт МДТ-и "ДЦХ ба номи академик Бобоҷон Гафуров", e-mail: [microwavetgu@gmail.com](mailto:microwavetgu@gmail.com)*

**MODE LOCKING SEVERAL GROUPS OF  
LONGITUDINAL MODES IN CW LASER**

*Halimjon Ghafurov - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of General Physics and Solid State of the PEI "KSU named after academic Bobojon Gafurov", e-mail: [microwavetgu@gmail.com](mailto:microwavetgu@gmail.com)*

**Ключевые слова.** лазер, синхронизация, продольные моды, импульсы, информация, квантовый компьютер.

*Для формирования многобитной информации в квантовых компьютерах, существенное значение имеет использование сверхкоротких световых импульсов. В данной работе показана возможность использования синхронизации множества продольных мод, для достижения предельного режима сжатия многобитной информации. Дополнительные группы продольных мод могут формироваться как за счет инверсной населенности, так и различного направления вектора поляризации излучения активной среды.*

**Вожаҳои калидӣ.** лазер, синхронизатсия, модҳои тҷлонӣ, импульсо, иттилоот, компютери квантӣ.

*Барои ташаккули иттилооти бисёрбита, дар компютерҳои квантӣ, истифодаи импульсои нури ултра кӯтоҳ муҳим аст. Дар ин мақола, мо имкони истифодаи синхронизатсияи модҳои тҷлонии сершуморро барои ноил шудан ба речаи ҳудудии фишурдани иттилооти бисёрбита нишон медиҳем. Гуруҳҳои иловагии модҳои тҷлонӣ ҳам аз ҳисоби захираи энергия ва ҳам самтҳои мухталифи вектори поляризатсияи шуоъкунии муҳити фаъол ташиқ карда мешаванд.*

**Key words:** laser, mode locking, longitudinal modes, pulses, information, quantum computer.

*For the formation of multi-bit information in quantum computers, the use of ultrashort light pulses is essential. In this paper, we show the possibility of using mode locking of multiple longitudinal modes to achieve the limiting mode of compression of multi-bit information. Additional groups of longitudinal modes can be formed both due to the inverse population and different directions of the polarization vector of the radiation of the active medium.*

Одним из возможностей лазеров непрерывного действия является режим генерации периодической последовательности сверхкоротких световых импульсов [1]. Для этого используют один из способов синхронизации продольных мод, которыми являются пассивная, активная или комбинированная. При активной синхронизации мод существенное влияние имеет согласование частоты задающего генератора и набора собственных частот продольных мод синхронизируемого лазера, которое достигается, за счет согласования длины резонатора или резонаторов. При пассивной синхронизации проблема согласования длины резонатора, менее критична, хотя она определяет период световых импульсов лазера. В связи с этим, наиболее стабильный режим генерации достигается при комбинированной синхронизации мод. Более того, создаются условия повышения стабильности в

определенных диапазонах рассогласования частот задающего генератора (импульсного лазера накачки) и собственных частот синхронизируемого лазера. Экспериментальное подтверждение такой возможности повышения стабильности режима генерации сверхкоротких световых импульсов, было отмечено в работе [2]. Другими исследованиями влияния рассогласования длины резонатора одного из лазеров на режим активной синхронизации продольных мод лазера было обнаружено изменение структуры сигнала биений [3]. Хотя в целом, картина сигнала биений оставалась стабильной и это было подтверждением стабильности установившегося режима генерации. По приведенным результатам регистрации излучения, трудно определить форму временной структуры. Подобная ситуация довольно часто встречается у исследователей импульсного режима генерации лазеров и нет возможности одновременного контроля как спектральных показателей так и временных характеристик.

Известно, что временные и спектральные характеристики однозначно связаны между собой согласно преобразованиям Фурье [4]. Это позволяет однозначно определить временную структуру согласно измерениям спектральных характеристик излучения. Более того, измерения ширины сигнала биений, с высокой точностью, показывают однозначную зависимость временной структуры излучения и спектрального состава излучения [5]. Для наглядной демонстрации этой возможности проведем численные расчеты сигнала биений и временной структуры результата интерференции различных вариантов гармонических колебаний как аналог режима синхронизации продольных мод непрерывного лазера. Также следует отметить значение анализа, стабильности неординарных режимов складывания гармонических колебаний используемых для формирования многобитной информации [6]

Согласно анализу временной структуры излучения непрерывных лазеров может иметь место генерация, как одиночных, так и групп импульсов на периоде, определяемом оптической длиной резонатора [7]. Известно, что оптическая длина резонатора, зависит от величины насыщенного усиления и поглощения. Для учета этих условий мы выбираем две группы гармонических колебаний. Центральная частота для одной группы колебаний задается переменной  $\omega$ , а другой переменной  $\Omega$ . Интервал частот между колебаниями в одной группе задается значением переменной  $\Delta\omega$ , а в другой группе значением переменной  $\Delta\omega_1$ . Количество колебаний в каждой группе задается значением переменной  $p$ .

Интерференция учитывается как сумма всех заданных колебаний согласно формулой:

$$e_i = \cos(2\pi\omega t_i) + \sum_{m=1}^p [\cos[2\pi(\omega + m\Delta\omega)t_i] + \cos[2\pi(\omega - m\Delta\omega)t_i]]$$

$$e_i = e_i + \cos(2\pi\omega t_i) + \sum_{m=1}^p [\cos[2\pi(\Omega + m\Delta\omega_1)t_i] + \cos[2\pi(\Omega - m\Delta\omega_1)t_i]]$$

Такое суммирование позволяет рассматривать суммирование двух групп продольных мод с одинаковыми так и различными значениями центральной частоты, интервала частот и количества колебаний участвующих в процессе интерференции. Распределение интенсивности от времени вычисляется по формуле:

$$I_i = (e_i)^2$$

Шкала частот привязывается к временной согласно  $f_i = i$ . Сигнал биений рассчитывается по формуле:

$$y = \text{cfft}(I).$$

График сигнала биений от частоты строится согласно формуле:

$$A_i = |y_i|.$$

На рис. 1 приводятся результаты расчета зависимости амплитуды и длительности интенсивности  $I_i$  от количества складываемых колебаний –  $p$ .

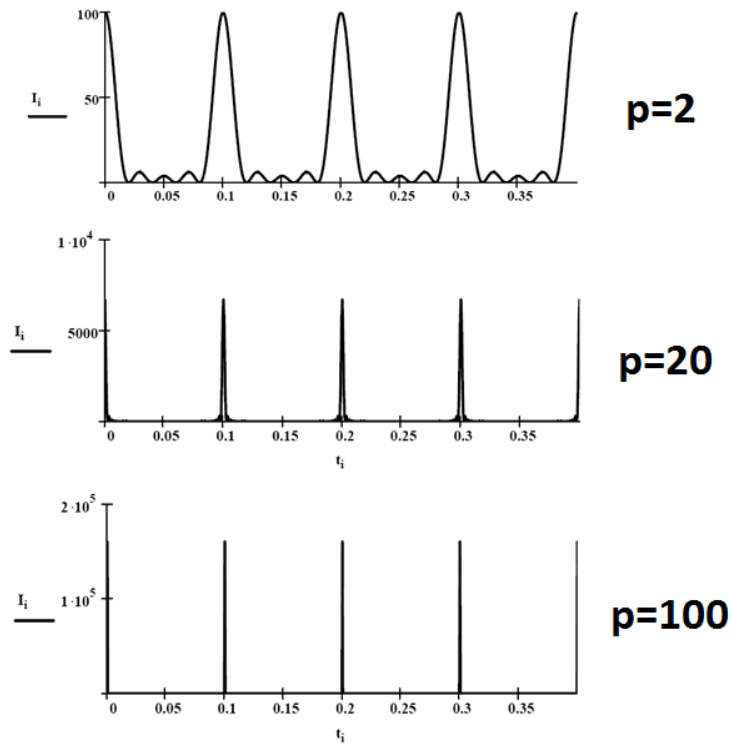


Рис.1 - Временная зависимость интенсивности интерференции от количества суммируемых колебаний для  $\Delta\omega = 10$  ,  $i = 0 \dots 10000$  ,  $\omega = 5000.0$  ,  $\Omega = 5000.0$  ,  $\Delta\omega_1 = 10.0$   $dt = 0.0005$  ,  $t_i = i * dt$ .

Для сравнения на рисунке 2 (а) приводится снимок временной развертки излучения лазера в режиме синхронизации около 100 продольных мод.

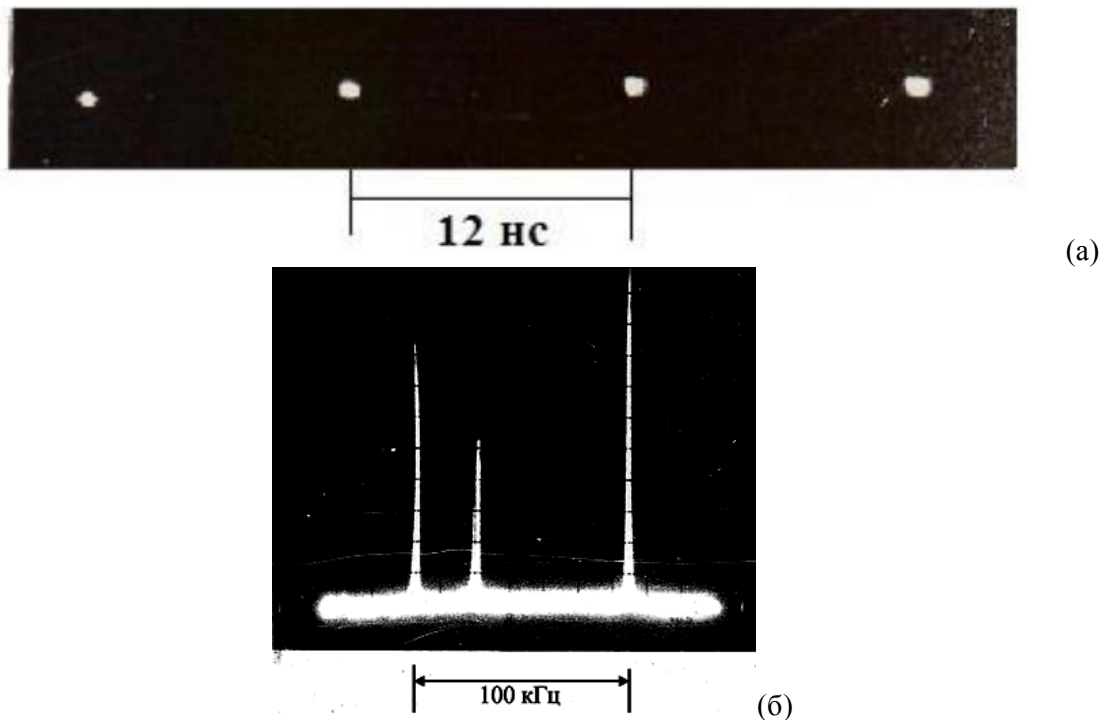


Рис.2 - Временная развертка – (а) и сигнал биений – (б) аргонного лазера в режиме пассивной синхронизации продольных мод.

Сигнал биений для режима пассивной синхронизации продольных мод аргонового лазера приведен на рис 2(б). В центре рисунка сигнал биений, а две реперные линии с двух сторон указывают масштаб частоты прибора С4-27 равной 100 кГц. Согласно приведенному рисунку, ширина сигнала биений определяется аппаратной функцией данного прибора и равна 1 кГц. Если учесть, что интервал между частотами  $1/12 \cdot 10^{-9}$  Гц =  $80 \cdot 10^6$  Гц то относительная стабильность частот колебаний составляет  $1 \cdot 10^3$  Гц /  $80 \cdot 10^6 = 0,012 \cdot 10^{-3} \approx 10^{-5}$ .

Результаты расчета амплитуды биений, возникающей как следствие суммирования двух групп гармонических колебаний, в соответствии с условиями рис.1 приводятся на рис.3. Видно, что амплитуда сигнала биений сильно зависит от количества складываемых колебаний. Если при  $p=2$  амплитуда биений составляет около 1500 условных единиц то при значении  $p=100$  эта величина равна  $6 \cdot 10^4$ , другими словами увеличивается в 40 раз. Аналогичная картина наблюдается и при переходе лазера в режим синхронизации продольных мод и сигнал биений резко увеличивается по амплитуде [6].

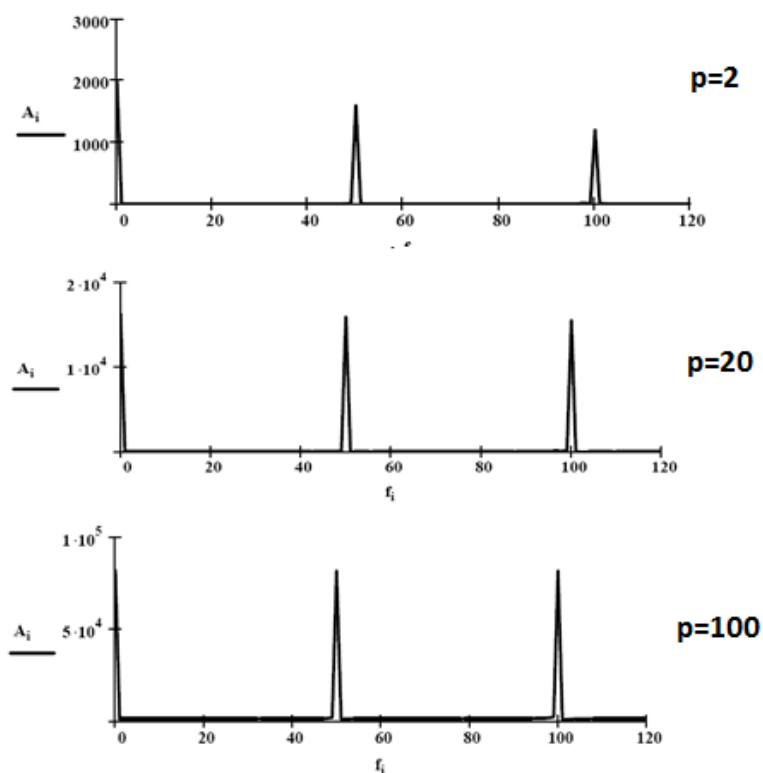


Рис. 3 - Зависимость амплитуды сигнала биений от количества суммируемых колебаний (остальные условия как на рис. 1).

Сравнивая результаты расчетов (рисунки 1 и 3) с экспериментальными результатами (рисунке 2) мы видим их полную качественную аналогию. Это позволяет нам проводить расчеты более сложных возможных случаев и сравнить их с результатами экспериментов, для получения ответа на вопросы установления каждого конкретного режима синхронизации мод. С этой целью были проведены расчеты временной и спектральной зависимости для двух групп гармонических колебаний, центральная частота которых отличаются ( $\omega \neq \Omega$ ) но интервал между частотами в обеих группах одинаковы ( $\Delta\omega = \Delta\omega_1$ ). Результаты расчетов приведены на рисунке 4.

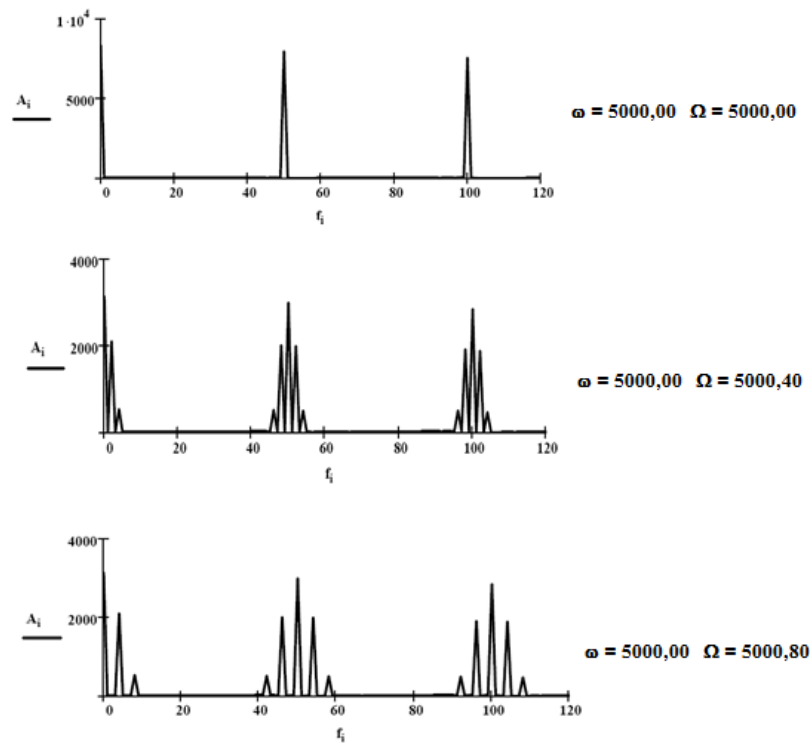


Рис. 4 - Зависимость структуры сигнала биений -  $A_i$  от частоты -  $f_i$  для разных центральных частот в одной из групп гармонических колебаний.

Результаты аналогичные рисунку 4 были получены в экспериментах авторов [3], по исследованию влияния рассогласования длины резонаторов при активной синхронизации мод непрерывного лазера на красителе. Для сравнения эти результаты приведены на рисунке 5.

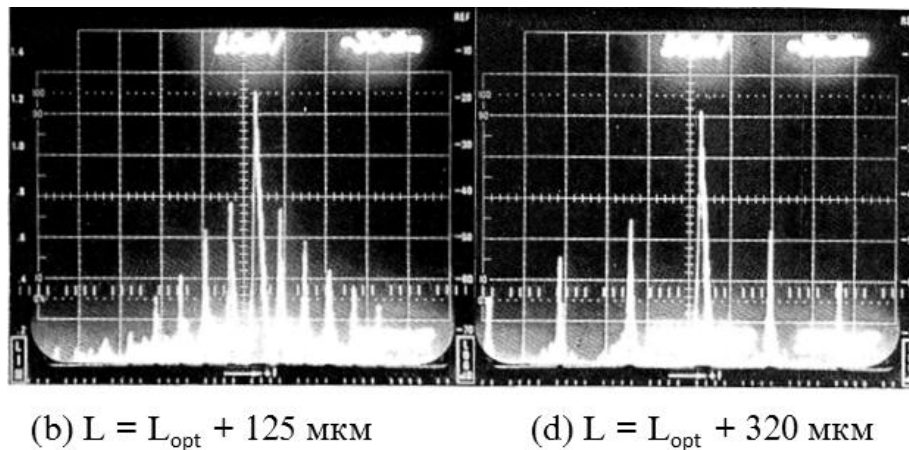


Рис. 5 - Сигналы биений между продольными модами при большой длине резонатора: (b)  $L = L_{opt} + 125$  мкм и (d)  $L = L_{opt} + 320$  мкм. согласно [3, стр 1147, рис. 3]. Масштаб экрана по горизонтали 200 кГц/дел. и по вертикали 10 дВ/дел. Частота центра экрана около 80.5-МГц, что соответствует интервалу между модами резонатора пустого резонатора -  $c/2L_0$ .

Полное качественное согласие результатов приведенных на рис.4 и 5 подтверждают логическую правильность проведенных расчетов для формирования последующих выводов.

В непрерывных лазерах возможна одновременная синхронизация нескольких групп продольных мод. Если центральная частота групп разная, то это однозначно проявляется на сигнале биений. Наблюдается набор сигналов биений и разница между этими сигналами определяет разницу центральных частот групп, определяемая разницей в оптической длине резонатора зависящая в свою очередь от значения насыщенного усиления и поглощения активной и пассивной среды. Это подтверждает механизм формирования сложной структуры излучения с несколькими импульсами на

одном периоде как следствие появления достаточного усиления или энергии для формирования новых импульсов на одном периоде, при увеличении коэффициента усиления лазера наблюдавшихся в работе авторов.

Сравнение результатов численных расчетов показывают возможность интерференции нескольких, а значит и множества групп гармонических колебаний, позволяющих формировать многобитную информацию в виде импульса. Это в свою очередь представляет собой режим синхронизации множества, а значит и бесконечного количества групп продольных мод непрерывных лазеров. Известно, что результат интерференции зависит от направления поляризации складываемых колебаний. Поэтому, для формирования групп продольных мод, можно воспользоваться направлением вектора поляризации, излучения активной среды, лазера. Если направление поляризации излучения будет квантованным, то это окажется выгодным и эффективным способом формирования множества групп продольных мод в непрерывных лазерах. Таким образом, мы можем достичь максимального сжатия информации в пределах одного импульса, который является результатом интерференции множества продольных мод в отдельных группах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Звелто О. Введение в физику лазеров // М.: Мир, 1979.–558 с.
2. Гафуров Х.Г., Криндач Д. П., Нехаенко В. А., Яковлев А. Г. Повышение стабильности непрерывного лазера на красителе с синхронным возбуждением при введении нелинейного поглотителя // Квантовая электроника - 1985 – Т.6 - №12 – С.1279-1282
3. MacFarlane D.L., Casperson L. W., and Tovar A.A. Spectral behavior and pulse train instabilities of asynchronously pumped mode-locked dye laser // J.Opt.Soc.Am.B – 1988 - Vol. 5- №5 – PP. 1144-1152
4. Толстов Г.П. Ряды Фурье // - 1983 - М.: Наука, – 392 с.
5. Гафуров Х.Г., Тошходжаев Х.А. Механизм высокой стабильности временной структуры лазера с синхронизацией мод // Изв. Акад. наук РТ Тадж. – 2020 – т.178 - №1 – С. 57 - 64
6. Гафуров Х.Г., Назаров Б.И., Абдуллаев С.Ф. Способ формирования многобитной информации в лазерах с пассивной синхронизацией мод // Изв. Акад. наук РТ Тадж. – 2019 – т.176 - №3 – С. 32-37
7. Виноградова А.А., Криндач Д.П., Назаров Б.И., Цапенко А.М. Получение пикосекундных импульсов генерации лазера на красителе, возбуждаемого излучением аргонового лазера с пассивно синхронизованными модами // Квантовая электроника - 1972 – Т.7 - №1 – С.219- 221

#### REFERENCES

1. Svelto O. Introduction to laser physics // M.: Mir, 1979.–558 p.
2. Gafurov Kh.G., Krindach D.P., Nekhaenko V.A., Yakovlev A.G. Improving the stability of a cw dye laser with synchronous excitation with introduction of a nonlinear absorber // Quantum electronics - 1985 - V.6 - no. 12 - PP.1279-1282
3. MacFarlane D.L., Casperson L.W., and Tovar A.A. Spectral behavior and pulse train instabilities of asynchronously pumped mode-locked dye laser // J.Opt.Soc.Am.B - 1988 - Vol. 5- No. 5 - PP. 1144-1152
4. Tolstov G.P. Ferrier series // - 1983 - M.: Nauka, - 392 p.
5. Gafurov Kh.G., Toshkhodzhaev Kh.A. The mechanism of high stability temporal structure of a mode-locked laser // Izv. Acad. Sciences RT Taj. - 2020 - v.178 - No. 1 - PP. 57 - 64
6. Gafurov Kh.G., Nazarov B.I., Abdullaev S.F. A method for the formation of multibit information in lasers with passive mode locking. News of the Academy of sciences of the Republic of Tajikistan. - 2019 - v.176 - No. 3 - PP. 32-37
7. Vinogradova A.A., Krindach D.P., Nazarov B.I., Tsapenko A.M. Obtaining picosecond pulses from a dye laser excited by passively mode-locked argon laser radiation // Quantum Electronics - 1972 - V.7 - No. 1 - PP.219-221