

1. Sachdeva R., Istratov A.A., Weber E.R. Recombination activity of copper in silicon // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 79. P. 2937–2939.
2. The use of cavities for gettering in silicon microelectronic devices / Donnelly S.E. [et al.] // Mat. Sci. Eng. B. 2003. V. 206. P. 422–426.
3. Gettering of copper to hydrogen-induced cavities in silicon / Wong-Leung J. [et al.] // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66. № 10. P. 1231–1233.
4. Wen C. Y., Spaeren F. Filling the voids in silicon single crystals by precipitation of Cu_3Si // Phil. Mag. 2007. V. 87. № 35. P. 5565–5579.
5. Бураков А. В., Якубеня С. Н., Янченко А. М. Прибор для бесконтактного измерения времени жизни неравновесных носителей заряда // ПТЭ. 1986. №4. С. 226–230.

УДК: 621.373:535

СТОХАСТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ГЕНЕРАЦИИ В ЛАЗЕРАХ С АНИЗОТРОПНЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ

Свирина Л.П.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Изучение сложных (хаотических и стохастических) режимов генерации актуально как для целей точного приборостроения, так и в связи с использованием таких режимов для кодирования и защиты информации, для объяснения закономерностей формирования динамических структур в многомерных нелинейных системах различного физического происхождения, а также для решения задач, связанных с возникновением порядка из хаоса.

Возможность возникновения стохастических режимов генерации, обусловленных влиянием случайных флуктуаций, исследовалась в лазерах с различными активными средами. В одномодовом линейном газовом лазере с анизотропным резонатором [1] при гармонической модуляции тока накачки наблюдались индуцированные шумом спонтанной эмиссии эффекты динамического восстановления поляризационной дестабилизации и стохастического блуждания траекторий в фазовом пространстве. В полупроводниковом лазере с инжекцией [2] показано, что периодические режимы генерации могут быть более чувствительными к воздействию шума спонтанной эмиссии, чем хаотические. В [3] изучалось влияние шума на долгопериодические режимы генерации, возникающие в результате каскада бифуркаций удвоения периода.

Целью настоящей работы является описание стохастических режимов генерации, возникающие под действием случайных флуктуаций, обнаруженных в анизотропных лазерах с линейной связью генерируемых волн: в четырехчастотном кольцевом He-Ne лазере (ЧКГЛ) и в двухчастотном твердотельном Nd:Yag лазере (ТТЛ) с диодной накачкой.

В ЧКГЛ с эллиптической поляризацией генерируемых волн чувствительные к воздействию случайных возмущений режимы генерации возникают при малых значениях коэффициента обратного рассеяния r [4].

Вблизи границы со стационарным режимом генерации бегущих волн при отстройке $x = -45.84$ МГц фиксируется асимметричный предельный цикл второго рода с вращением разности фаз. При этом интенсивность одной из волн I_2^- колеблется вблизи нуля, что делает систему чувствительной к воздействию случайных флуктуаций, природа которых может быть различной.

На рис. 1 показано влияние слабого возмущения на фазовые проекции и спектры мощности колеблющейся вблизи порога интенсивности I_2^- (левая колонка) и разности фаз Ψ_2 (правая колонка) при $r = 0.00001$, $x = 45.84$ МГц в отсутствие (а, в) и при наличии (б, г) белого шума.

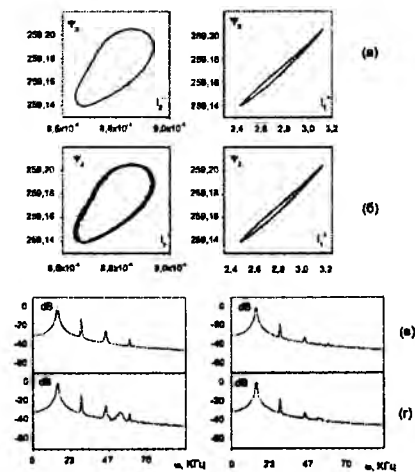


Рисунок 1

Проследим эволюцию данного предельного цикла II рода при увеличении отстройки частоты генерации от центра линии в присутствии δ -коррелированного белого шума с амплитудой $D = 10^{-7}$. Последовательность временных

реализаций и спектров мощности для интенсивностей I_2^\pm приведена на рис.2

Временные зависимости и спектры мощности для I_2^+ отмечены черным, а для I_2^- - серым цветом.

Как видно из рисунка, при $x = -45.84$ МГц (а) фиксируется асимметричный предельный цикл в присутствии слабых возмущений, влияющих только на I_2^- . При $x = -47.04$ МГц (б) I_2^- полностью управляется шумом, т.е. режим становится стохастическим. При $x = -47.42$ МГц (в) вследствие нелинейного взаимодействия интенсивность волны I_2^- увеличивается, так что она становится нечувствительной к шуму, но при этом, как видно из рис.2, в, сложные колебания претерпевают все переменные, что соответствует асимметричному хаосу. И, наконец, при $x = -48.47$ МГц (г) фиксируется долгопериодический асимметричный предельный цикл со сложной формой колебаний.

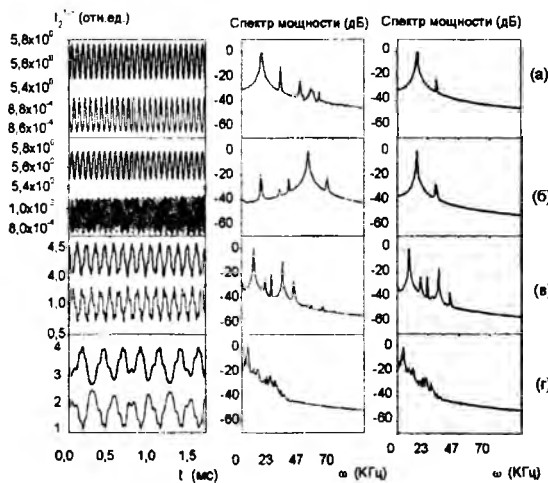


Рисунок 2

При дальнейшем увеличении отстройки частоты генерации относительно центра контура усиления, вследствие бифуркации типа вилки, рождается симметричный предельный цикл, который эволюционирует в симметричный хаос типа перемежаемости, за которым следует стационарный режим генерации двух стоячих волн.

В ТТЛ лазере [5] с линейной фазовой и амплитудной анизотропией резонатора влияние случайных флуктуаций обнаружено в припороговой области генерации. Анализ бифуркационной диаграммы, рассчитанной на плоскости экспериментально регулируемых параметров: превышения накачки над порогом η и величины фазовой анизотропии резонатора $\Delta\omega$, позволил сделать вывод о возможности существования режимов генерации, чувствительных к воздействию случайных флуктуаций.

Действительно, в области значений линейной фазовой анизотропии, близких к величине зоны захвата $\Delta\omega = \Delta\omega_L$, линия нейтральности, на которой рождается устойчивый предельный цикл, проходит вблизи порога генерации $\eta=1$. В присутствии δ -коррелированного белого шума с малой интенсивностью $D=10^{-5}$, в данной области обнаружен индуцированный шумом режим сложных (стохастических) колебаний, возникающий в результате стохастизации периодического режима генерации.

Влияние случайных флуктуаций в припороговой области генерации иллюстрирует рис.3, на котором для $\eta = 1.12$, $\Delta\omega = 90$ КГц приведены фазовые проекции (а,в) и временные реализации (б,г) для интенсивностей $I_{x,y}$ и разности фаз Ψ ортогональных линейно поляризованных вдоль осей x и y волн в отсутствие (а,б) и в присутствии (в,г) случайных флуктуаций.

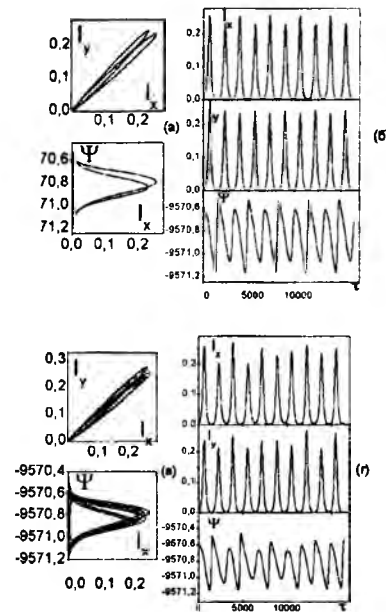


Рисунок 3

Выявлены механизмы возникновения стохастических (индуцированных шумом) режимов генерации в анизотропных газовом и твердотельном лазерах с линейной связью генерируемых волн. Показано, что нелинейное взаимодействие в условиях многомодовой генерации может приводить к возникновению периодических режимов с колебаниями интенсивности одной из волн вблизи порога генерации, что делает систему чувствительной к воздействию случайных флуктуаций, природа которых может быть различной. Индуцированные шумом режимы могут возникать также вследствие стохастизации периодического режима при прохождении линии рождения предельного цикла вблизи порога генерации.

1. Gudelev, V.G. Antiphase polarization dynamics influenced by noise in a single-mode gas laser / V.G. Gudelev, L.P. Svirina, and Yu.P. Zhurik // Proc. of SPIE. – 1996. – V. 2792. – P. 119–125.
2. Hwang, S.K. Noise-induced chaos in an optically injected semiconductor laser model / S.K. Hwang, J.B. Gao, and J.M. Liu // Phys. Rev.E. – 2000. – V. 61, N 5. – P. 5162–5170.
3. Gao, J.B. When can noise induce chaos? / J.B. Gao, S.K. Hwang, and J.M. Liu // Phys.Rev.E. – 1999. – Vol. 82. N6. – P. 1132-1137.
4. Свирина, Л.П. Фазовая неустойчивость в четырехчастотном кольцевом газовом лазере / Л.П. Свирина // Квант. электрон. 2008. Т.38. №1. С. 1-15.
5. Свирина, Л.П. Фазовая неустойчивость в одномодовом твердотельном лазере с анизотропным резонатором / Л.П. Свирина // Опт. и спектр. 2009. Т.107. № 2. С.207-212.

УДК 621.383

ОБ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ ЯЧЕЕК

Серебрякова Л.М.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Полимерные и низкомолекулярные органические полупроводники характеризуются разнообразными оптическими и электрофизическими свойствами, технологичностью и дешевизной, что делает их перспективными материалами для широкого использования в преобразователях солнечной энергии - фотовольтаических ячейках (ФЯ) [1-5]. Такие ФЯ представляют собой многослойные тонкопленочные (с толщинами слоев от десятков до сотен нм) системы с одним (Рис. 1) или несколькими гетеропереходами. На сегодняшний день их эффективности составляют

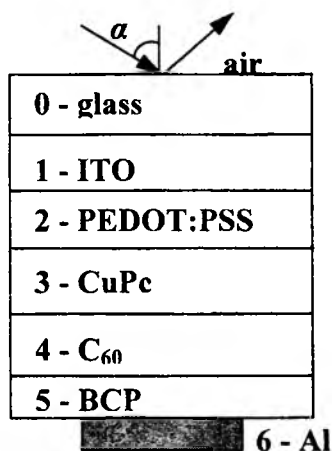


Рисунок 1

всего несколько процентов, однако общепризнано [1-5], что они могут быть повышены за счет оптимизации структуры ячейки. Эффективность преобразования ячейкой световой энергии в электрическую в конечном итоге определяется плотностью генерируемого ею фототока, в формирование которого вносят вклад следующие факторы: а) пространственное интерференционное перераспределение интенсивности светового поля по всей глубине ячейки с учетом угла паде-

ния света на ячейку и его многократных переотражений - когерентных в слоях и некогерентных в подложке; б) пространственное и спектральное распределения плотности энергии, поглощенной в активных слоях вблизи гетероперехода; в) процессы генерации и диссоциации экситонов; г) оптические и электрофизические свойства всех материалов, образующих ФЯ, и особенно материалов донорного и акцепторного слоев.

В настоящей работе приведены результаты численного моделирования и оптимизации структуры ФЯ с учетом всех перечисленных факторов. Исследованы ячейки на основе четырех гетеропереходов, содержащих фталоцианины меди (CuPc) или ванадила (VOPc) в качестве донора и дибензимидазол-перилен-3,4,9,10-тетракарбоновой кислоты (PTCBI) или фуллерен (C₆₀) в качестве акцептора.

Пространственное распределение поля и поглощенной энергии в многослойной ФЯ анализировалось на основе строгого решения граничной задачи. Пусть из воздуха со стороны стеклянной подложки свет наклонно падает на пятислойную систему (Рис. 1), в которой glass - стеклянная подложка, ITO (сплав оксидов индия и олова) - катод, Al - анод, PEDOT:PSS (poly (styrenesulfonate)/ poly (2, 3-dihydrothieno [3, 4-b]-1,4-dioxin) и BCP (2,3-dimethyl-4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline) - буферные слои, CuPc и PTCBI - соответственно донорный и акцепторный слои. При этом в каждом j -ом слое ($j = 1 \div 5$) интенсивность электрического поля $I_j(x)$ и плотность поглощенной энергии $W_j(x)$ как функции координаты x ($0 \leq x < d_j$, d_j - толщина j -го слоя) описываются выражениями:

$$I_j(x) = |E_{js}(x)|^2 + |E_{jp}(x)|^2,$$

$$W_j(x) = (2\pi c \epsilon_0 / \lambda) (k_j n_j) I_j(x),$$