

3. *Dresselhaus M S, Eklund P C, Dresselhaus G*, Science of fullerenes and carbon nanotubes (San Diego: Academic Press, 1996)
4. *Saito R, Dresselhaus M S, Dresselhaus G*, Physical properties of carbon nanotubes (London: Imperial Colledge Press, 1998)
5. *Dresselhaus M S, Dresselhaus G, Avouris P*, Carbon nanotubes: synthesis, structure, properties and applications (Berlin: Springer, 2001)
6. *Balandin A*. Thermal properties of graphene and nanostructured carbon materials, Nature Materials 10, pp.569-581, 2011
7. *Браже Р.А., Нефедов В.С.*, Теплопроводность углеродных супракристаллических нанотрубок / Браже Р.А., Нефедов В.С. – ФТТ. – 2012. – V. 3 – P. 1435-1438
8. *Кузнецов В.М., Хромов В.И.*, Фрактальное представление теории Дебая для исследования теплоемкости макро- и наноструктур, ЖТФ, том 78, вып. 11, 2008
9. *Завальнюк В.В.*, Колебательные возбуждения в графене и углеродных нанотрубках с точечными дефектами: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.02: защищена 21.12.2012. – Одесса, 2012. – 120 с.
10. *Ziman J. M*, 1960 Electrons and phonons. The Theory of Transport Phenomena in Solids / Ziman J.M. – Oxford: Clarendon Press, 1960
11. *Ecsedy D J, Klemens P G*, Phys. Rev. B 15 5957 (1997)
12. *Klemens P G, Pedraza D F*, Carbon 32 735 (1994)
13. *Reich S., Jantoljak H. and Thomsen C.*, Phys. Rev. B, 61, R13389 (2000)
14. *Nika D L, Balandin A.A*. Ph, onon transport in graphene (2012)

## **АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ТЕПЛООВОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С НЕЛИНЕЙНЫМИ КОГЕРЕНТНЫМИ ПОТЕРЯМИ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ГЕНЕРАЦИИ НЕКЛАССИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ**

**А. А. Сакович**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Одним из способов устойчивого создания неклассических состояний в оптических системах является применение искусственно созданной диссипации. В работе [1] был рассмотрен один из возможных случаев – нелинейные когерентные потери (НКП). Было показано, что в системах с НКП возможно создание таких существенно неклассических состояний, как фоковские с произвольно высокой точностью. Однако в реальных системах НКП, как правило, сопровождаются дополнительными потерями: например, линейными потерями. В работе [2] была изучена эволюция системы, подверженной НКП вместе с линейными потерями или тепловым возбуждением. Было отмечено, что линейные потери приводят систему в вакуумное состояние, тогда как тепловое возбуждение приводит к устойчивой генерации неклассических состояний.

В настоящей работе исследуется потенциал теплового возбуждения как защиты от присутствующих в системе линейных потерь. При этом наряду с постоянным режимом возбуждения рассматривается ранее не изученный зависящий от времени режим – периодический.

### УПРАВЛЯЮЩЕЕ УРАВНЕНИЕ

В работе рассматривается диссипативная динамика одной моды оптического поля, подверженной НКП, постоянным линейным потерям и управляемому во времени тепловому возбуждению в марковском приближении. Эволюция такой системы (в картине взаимодействия) описывается уравнением Линдблада (1):

$$\frac{d\rho}{dt} = \gamma L(A)\rho + \Gamma_0 L(a)\rho + \eta(t) f(a+1)\rho + \Gamma \bar{n} L(a^\dagger)\rho, \quad (1)$$

где  $L(a)\rho = 2ax\rho - x^\dagger x\rho - \rho x^\dagger x$  – супероператор Линдблада,  $a$  и  $a^\dagger$  – операторы уничтожения и рождения фотона соответственно,  $A = af(a^\dagger)$  – деформированный оператор уничтожения,  $\Gamma$  – константа связи с тепловым резервуаром,  $\Gamma_0$  и  $\gamma$  – скорости линейных и нелинейных потерь,  $\bar{n}$  – среднее число фотонов накачки. Дополнительный зависящий от времени коэффициент  $\eta(t)$  задает режим возбуждения, а скалярная функция  $f(a)$  определяется свойствами НКП.

Первое слагаемое в уравнении (1) отвечает за НКП, второе – за линейные потери, третье – за тепловое возбуждение.

Особенность уравнения (1) при любых режимах накачки заключается в том, что единственно возможным стационарным состоянием системы является диагональное в фоковском базисе состояние. Поэтому устойчивое создание чистого состояния, отличного от фоковского, в такой системе невозможно, в отличие от чистых НКП. Это важно из-за того, что типичной управляющей функцией  $f(a)$ , которую можно реализовать на практике, является функция  $f(a) = n - m$ , где  $m$  – целое число (см. например работу [3]), которая в случае чистых НКП приводит систему в фоковское состояние [1]. Везде далее для определенности будет рассматриваться управляющая функция такого вида. Из-за указанной особенности эволюции системы всюду далее рассматривается только главная диагональ матрицы плотности в фоковском базисе.

## ПОСТОЯННЫЙ РЕЖИМ

Стационарное состояние системы, эволюционирующей согласно уравнению (1), в случае постоянного режима ( $\eta \ll 1$ ) является диагональным состоянием со следующим соотношением между элементами главной диагонали:

$$\rho_{nn} = \rho_{n-1n-1} \frac{\bar{n}}{1 + \bar{n} + \Gamma_0/\Gamma + (\gamma/\Gamma)f}, \quad (2)$$

где  $\rho_{ij}$  – элемент матрицы плотности в фоковском базисе. Данный результат является обобщением результата, полученного в работе [2].

Данное состояние, как и тепловое, является смесью фоковских состояний с монотонно убывающими коэффициентами. Отличием состояния (2) от теплового состояния является более сильное затухание элементов главной диагонали с ростом порядкового номера. При рассматриваемой функции  $f$  такое состояние – неклассическое (доказательство см. в работе [2]).

Пример распределения элементов главной диагонали для такого состояния при параметрах  $m=1, \Gamma=\Gamma_0=\gamma=1$  показан на рис. 1.

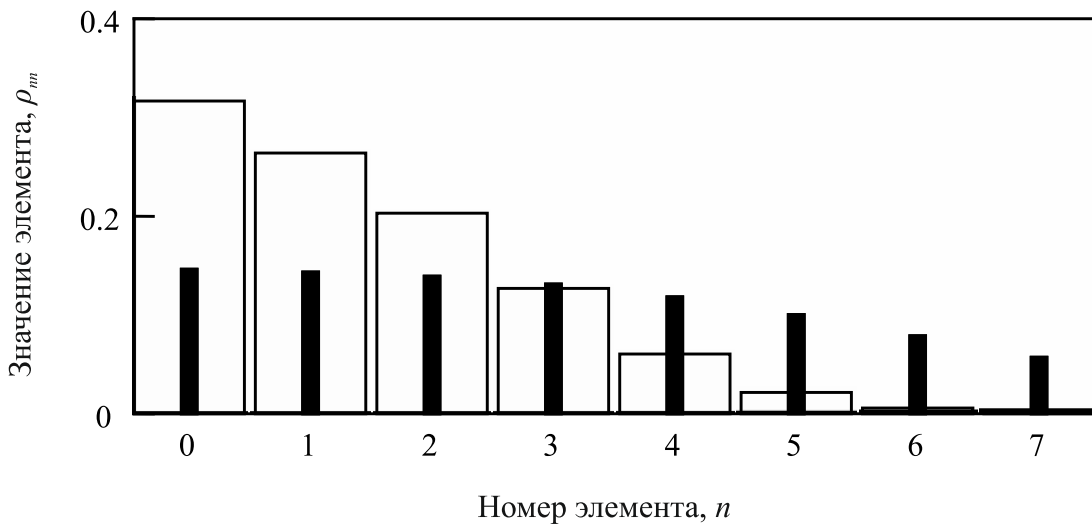


Рис. 1. Распределение элементов главной диагонали матрицы плотности в случае постоянного теплового возбуждения:  
белый цвет –  $\bar{n} = 10$ , черный –  $\bar{n} = 100$

## ПЕРИОДИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

Периодический режим возбуждения соответствует случаю

$$\eta(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq \alpha\tau \\ 1, & \alpha\tau \leq t \leq \tau \end{cases} \quad (3)$$

где  $\tau$  – период эволюции,  $\alpha$  – доля периода, в течение которого накачка отключена,  $\eta(t + \tau) = \eta(t)$ .

Основная идея периодического режима состоит в том, что рассмотренное выше состояние является хорошим начальным состоянием для генерации более неклассических, чем оно само, состояний НКП и линейными потерями без тепловой накачки, но на конечных временах. По истечении характерного времени «свободной» эволюции, чтобы не дать системе «свалиться» в вакуумное состояние, накачка опять включается на короткое время и процесс повторяется.

Пока накачка отключена, система эволюционирует схожим со случаем чистых НКП образом: происходит дрейф элементов главной диагонали к нулевому элементу при «аккумуляции» потока на том элементе, на котором обращается в ноль управляющая функция. Поэтому при периодическом возбуждении усредненное по периоду состояние будет ближе к чистому фоковскому состоянию, чем при постоянном возбуждении. В частности, при  $m=1$ ,  $\Gamma=\Gamma_0=\gamma=1$  и  $\bar{n}=100$  перекрытие данных состояний с фоковским составляет 0,40 и 0,14 соответственно.

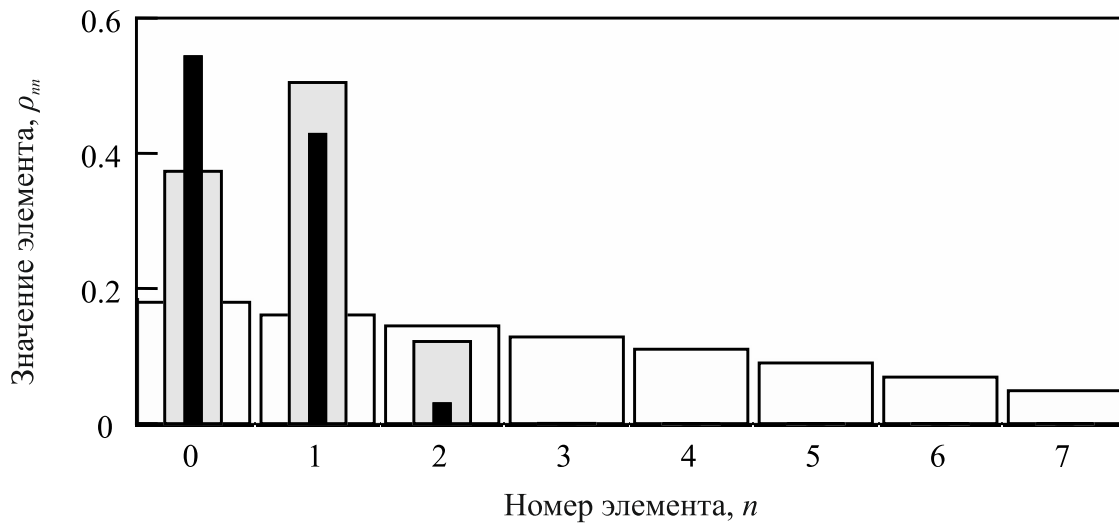


Рис. 2. Эволюция элементов главной диагонали матрицы плотности при периодическом возбуждении при следующих значениях параметров:

$$m=1, \Gamma=\Gamma_0=\gamma=1, \bar{n}=100, \tau=0,51, \alpha=0,95$$

( $t$  - время эволюции): белый цвет –  $t=3\tau$ , серый цвет –  $t=3,5\tau$ , черный цвет –  $t=3,85\tau$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Постоянное тепловое возбуждение обеспечивает устойчивое создание неклассических состояний в системах, подверженных вместе с НКП линейным потерям. Однако такие состояния сильно отличаются от получаемых в системах с чистыми НКП. В случае определенной управляющей НКП функции приблизить генерируемые состояния к случаю чистых НКП можно, заменив постоянное тепловое возбуждение периодическим во времени. Однако при этом генерируемое состояние является более неклассическим только в среднем (по периоду возбуждения).

### Литература

- A. *Mikhalychev, D. Mogilevtsev, S. Kilin*. Nonlinear coherent loss for generating non-classical states // *J. of Phys. A: Math. Theor.* Vol. 44. 2011. № 32. P. 325307–325323.
1. A. *Mikhalychev, D. Mogilevtsev, V. S. Shchesnovich, et al.* Overcoming Linear Dissipation by Designed Nonlinear Loss // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems.* Vol. 16. 2013. №2. P. 162–179.
  2. D. *Mogilevtsev, V. S. Shchesnovich*. Single-photon generation by correlated loss in a three-core optical fiber // *Optt. Lett.* Vol. 35. 2010. № 35. P. 3375–3377.

## ЭЛЕМЕНТНЫЙ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ СИСТЕМЫ Ti-Zr-Si-N

1.А. М. Сувалов

### ВВЕДЕНИЕ

Особый интерес представляют нитриды переходных металлов групп IVA-VIA, характеризующиеся высокой твердостью, термической и коррозионной устойчивостью. Так, TiN обладает высокой твердостью, а ZrN – коррозионной устойчивостью. У более сложных по составу покрытий TiZrN проявляется наследование этих свойств. При легировании Si в TiN у системы Ti-Si-N обнаруживается сверхвысокая твердость [1]. Таким образом, ожидается, что покрытия Ti-Zr-Si-N будут характеризоваться более высокой твердостью, термической и коррозионной устойчивостью, чем моонитридные покрытия.

### 1.МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Тонкопленочные покрытия Ti-Zr-Si-N толщиной ~400 нм были сформированы методом реактивного магнетронного распыления, а именно: одновременным осаждением материала трех катодных мишеней (Ti, Zr, Si) в атмосфере Ar+N<sub>2</sub> на кремневые подложки при температуре 600 °С. Изме-