

## УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

# Режимы генерации Nd:YAG-лазера с синхронизацией мод акустооптическим модулятором бегущей волны и сферическим зеркалом

А.В.Грибанов, В.И.Донин, Д.В.Яковин

*Исследованы режимы генерации диодно-накачиваемого Nd:YAG-лазера с синхронизацией мод сферическим зеркалом и акустооптическим модулятором бегущей волны (метод СЗАОМ). Изучена динамика генерации при отстройке межмодового интервала от удвоенной рабочей частоты модулятора, а также при изменении дифракционной эффективности модулятора. Приведены результаты измерения длительности импульсов и частотного спектра выходного излучения.*

**Ключевые слова:** Nd:YAG-лазер, диодная накачка, модуляция добротности, синхронизация мод, релаксационные колебания.

## 1. Введение

В работах [1–4] был предложен новый метод, позволяющий реализовать одновременно синхронизацию мод и модуляцию добротности (QML) в твердотельных лазерах. Режим QML устанавливался с помощью комбинации сферического зеркала резонатора и акустооптического модулятора (АОМ) бегущей волны (метод СЗАОМ). В этих работах модуляция добротности обеспечивалась периодическим отключением звуковой волны. В работе [5] обнаружено, что режим QML может возникать и без отключения звуковой волны, при этом модуляция добротности осуществлялась на частоте релаксационных колебаний лазера. Данный режим, названный автоQML-режимом, наблюдался при равенстве межмодового интервала лазера и удвоенной частоты бегущей звуковой волны модулятора. Ранее такой режим был реализован в твердотельных лазерах с АОМ стоячей волны [6–8], однако он возникал только при отстройке межмодового интервала от частоты звуковой волны модулятора. В качестве недостатка этого режима генерации в работах [6–8] отмечено увеличение длительности отдельных импульсов в цуге (по сравнению со случаем точного совпадения межмодового интервала и звуковой частоты). Авторы работы [9], применив теорию [10, 11], провели анализ автоQML-режима с АОМ бегущей волны и показали, что коэффициент дифракционной связи  $k_d$  (дифракционная эффективность АОМ) может служить управляющим параметром для управления динамическими режимами генерации лазера.

В настоящей работе проведено исследование динамики генерации Nd:YAG-лазера с СЗАОМ в зависимости от дифракционной эффективности АОМ и отстройки межмодового интервала лазера от удвоенной частоты бегущей звуковой волны модулятора. Автокорреляционным

методом измерена длительность импульсов выходного излучения в различных режимах генерации при разной поляризации излучения в резонаторе. Кроме того, измерен частотный спектр выходного излучения.

## 2. Схема эксперимента

Схема лазера с четырехзеркальным Z-образным резонатором показана на рис.1. Активным элементом служил кристалл Nd:YAG диаметром 2 мм и длиной 63 мм с поперечной диодной накачкой на  $\lambda = 808$  нм. Зеркало 32 было плоским, радиусы кривизны сферических зеркал 31, 33 и 34 составляли 300, 200 и 150 мм соответственно. Коэффициенты отражения плотных зеркал 32–34 на рабочей длине волны 1064 нм превышали 99.5%. Выходное зеркало имело коэффициент пропускания 14% на  $\lambda = 1064$  нм. Брюстеровские пластинки из плавящего кварца могли поворачиваться на  $90^\circ$  относительно оптической оси резонатора, обеспечивая нужную поляризацию излучения: перпендикулярную ( $\perp$ ) или параллельную ( $\parallel$ ) горизонтальной плоскости. Оптическая длина резонатора  $L$  составляла  $\sim 150$  см. Акустооптический модулятор с просветленными торцами (модель МЗ-322) располагался под углом Брэгга к оптической оси резонатора рядом с концевым сферическим зеркалом 31. Оптическая длина пути между зеркалом 31 и центром модулятора была равна радиусу кривизны этого зеркала. На пьезопреобразователь АОМ подавалась рабочая частота  $f = 50049.6$  кГц, равная половине межмодового интервала лазера ( $c/2L = 2f$ ).

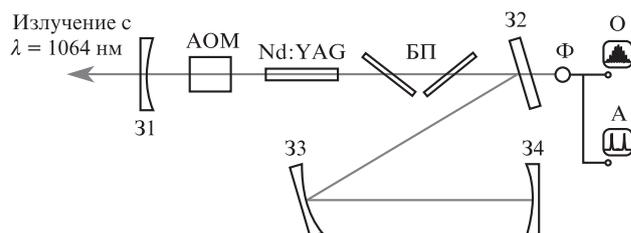


Рис.1. Схема лазера: 31–34 – зеркала резонатора; БП – брестеровские пластинки; Φ – лавинный фотодиод; О – осциллограф; А – анализатор спектра.

А.В.Грибанов, В.И.Донин, Д.В.Яковин. Институт автоматизации и электротехники СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1; e-mail: donin@iae.nsk.su

Поступила в редакцию 11 мая 2018 г.

Излучение, проходящее сквозь плотное зеркало 32, регистрировалось лавинным фотодиодом ЛФД-2, сигнал с которого направлялся на осциллограф и анализатор спектра SF 300 (Rohde&Schwarz).

### 3. Результаты экспериментов и их обсуждение

Первоначально были проведены эксперименты при неизменной дифракционной эффективности АОМ ( $k_d = 2.5\%$ ). Изменялась длина резонатора, т.е. вводилась отстройка межмодового интервала лазера от частоты  $2f$ . Синхронизация мод в непрерывном режиме (CWML), показанная на рис.2,а и б, наблюдалась в пределах отстройки длины резонатора  $\Delta L \approx \pm 2$  мкм, что соответствует частотной отстройке  $\Delta\nu \approx \pm 130$  Гц. При плавном

увеличении отстройки начинались пульсации (рис.2,в), которые постепенно превращались в автоQML-режим генерации (рис.2,з) при  $\Delta L = \pm 70$  мкм ( $\Delta\nu \approx \pm 4.7$  кГц). Данный режим оставался стабильным вплоть до отстроек  $\Delta L \approx -600$  мкм ( $\Delta\nu \approx -40$  кГц) и  $\Delta L \approx 400$  мкм ( $\Delta\nu \approx 27$  кГц), при которых стабильность режима начинала нарушаться (см. рис.2,д и е). При увеличении отстройки изменялась частота цугов импульсов от 25 кГц при  $\Delta L = \pm 70$  мкм до 40 кГц при  $\Delta L = -600$  мкм и  $\Delta L = 400$  мкм. Следует особо отметить, что во всем используемом диапазоне отстроек внутри цугов наблюдалась полная синхронизация мод.

Наши эксперименты показали, что при точной настройке длины резонатора ( $\Delta L = 0$ ) режим генерации зависит от коэффициента  $k_d$ . Синхронизация мод в непрерывном режиме наблюдалась при мощности звукового

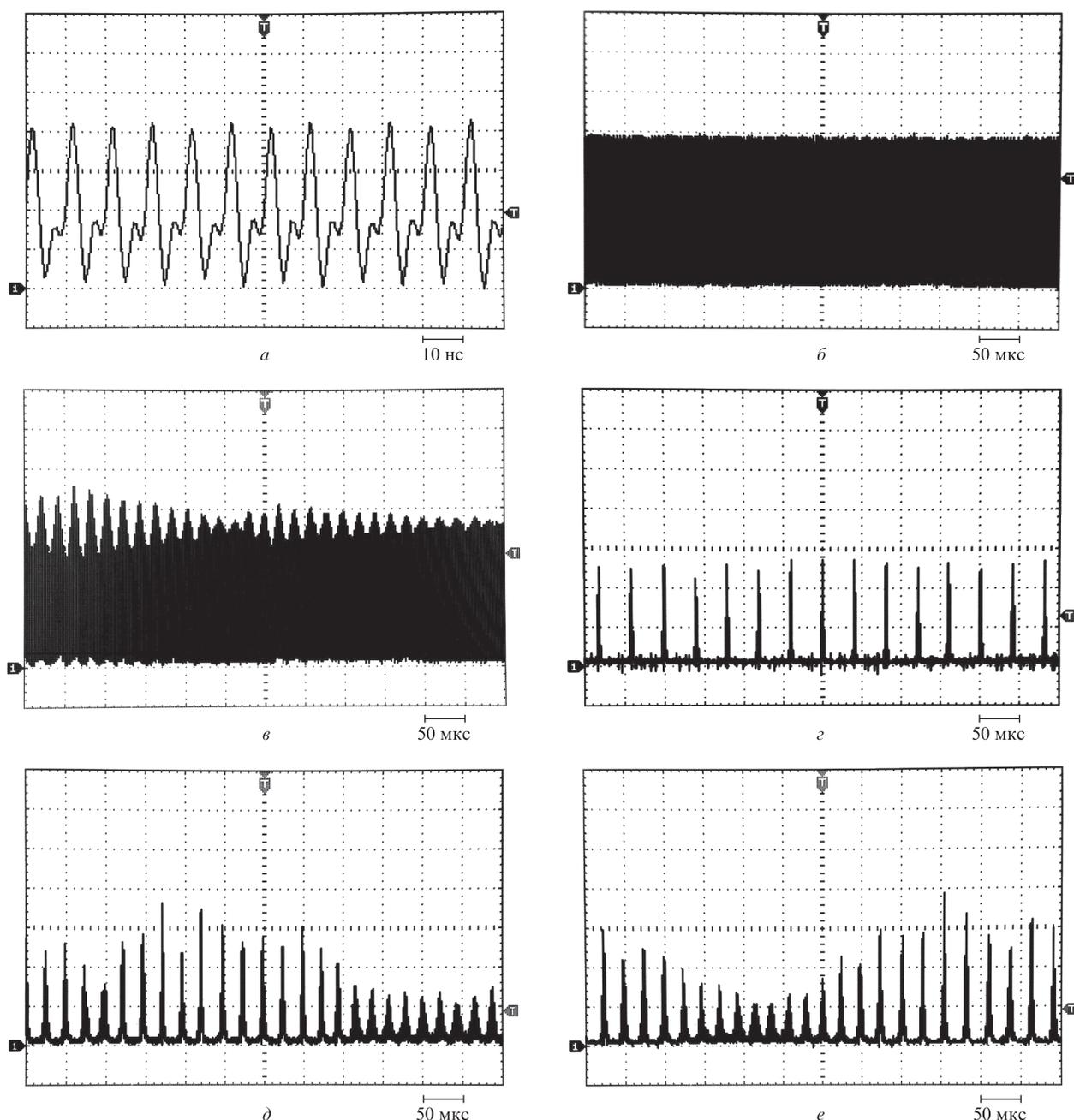


Рис.2. Осциллограммы выходного излучения лазера при  $\Delta L = 0$  (а, б),  $\pm 3$  (в),  $\pm 70$  (з),  $-600$  (д) и  $400$  мкм (е). Знак «←» соответствует уменьшению длины резонатора.

сигнала  $\sim 0.2$  Вт и соответствующей ей дифракционной эффективности  $k_d = 2.5\%$ . При увеличении мощности звука возникали пульсации, аналогичные показанным на рис.2,в. Устойчивый режим автоQML наблюдался, когда мощность звукового сигнала достигала примерно 0.5 Вт ( $k_d = 10\%$ ). Дальнейшее увеличение мощности звукового сигнала приводило к нарушению автоQML-режима: пульсации принимали нерегулярный характер, аналогичный показанному на рис.2,д,е. Такой режим генерации сохранялся вплоть до ее исчезновения при мощности звукового сигнала  $\sim 1.32$  Вт ( $k_d = 27\%$ ). При этой же мощности осуществлялся QML-режим генерации (путем периодического отключения звукового сигнала с частотой 2 кГц).

На рис.3 показан частотный спектр выходного излучения вблизи резонансной частоты  $c/2L$  в режимах CWML и автоQML при  $\Delta L = 0$ . На рис.3,а видны слабые боковые составляющие на релаксационной частоте. Отношение сигнал/шум составило  $\sim 60$  дБ в режиме CWML и  $\sim 40$  дБ в автоQML-режиме. Частотный спектр в режиме QML ранее изучен нами в работе [12].

Длительность импульсов выходного излучения измерялась оптическим коррелятором с генерацией второй гармоники в нелинейном кристалле по неколлинеарной схеме. Измерения проводились для  $\perp$ -поляризации и  $\parallel$ -поляризации в резонаторе при точной настройке длины резонатора ( $\Delta L = 0$ ). При повороте брестеровских пластинок АОМ также поворачивался на  $90^\circ$ . Направление поляризации света и направление распространения звуковой волны в АОМ были ортогональны.

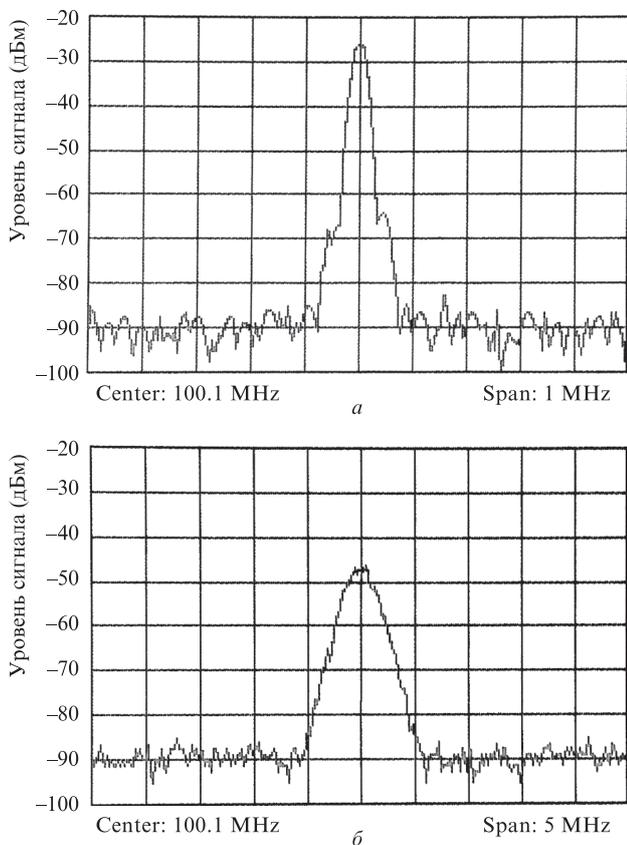


Рис.3. Часть спектра лазера на экране спектроанализатора при  $\Delta L = 0$ : а – режим CWML (цена деления по оси абсцисс 100 кГц); б – автоQML-режим (цена деления по оси абсцисс 500 кГц).

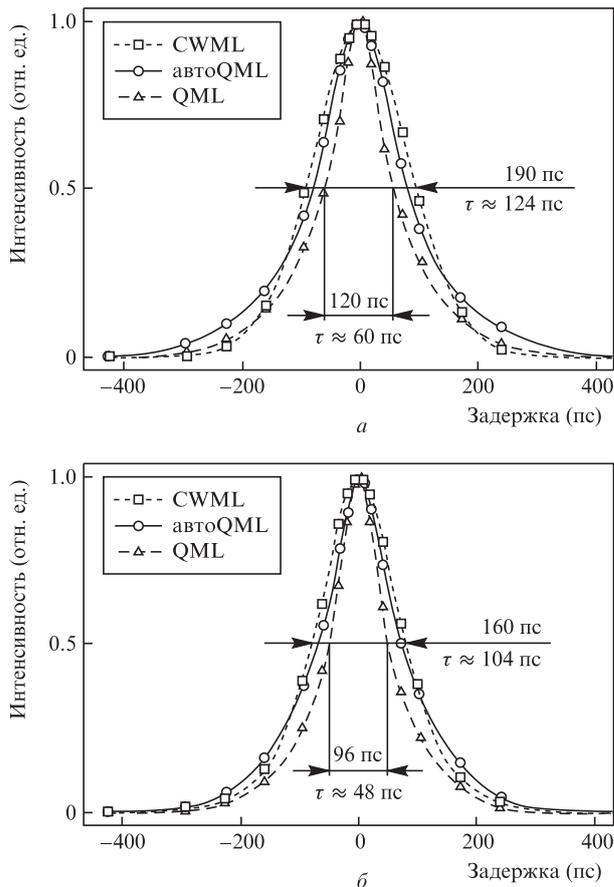


Рис.4. Автокорреляционные функции импульсов при  $\Delta L = 0$  в CWML-, автоQML- и QML-режимах генерации лазера для  $\perp$ -поляризации (а) и для  $\parallel$ -поляризации излучения в резонаторе (б).

Результаты измерения длительности импульсов  $\tau$  приведены на рис.4. Автокорреляционная функция импульсов в CWML-режиме близка по форме к функции  $\text{sech}^2$ . В этом случае длительность импульсов составила 104 пс для  $\parallel$ -поляризации и 124 пс для  $\perp$ -поляризации. В автоQML-режиме форма автокорреляционной функции изменялась: ее края оставались широкими, а центральная часть сужалась. Данный эффект еще сильнее сказывался в режиме QML, в котором форма автокорреляционной функции оказывалась близкой к таковой в случае импульса экспоненциальной формы (single sided exponential). Если предположить экспоненциальную форму импульсов, то их длительность в автоQML-режиме составит 70 пс в случае  $\parallel$ -поляризации и 80 пс в случае  $\perp$ -поляризации, а в режиме QML – 48 пс для  $\parallel$ -поляризации и 60 пс для  $\perp$ -поляризации. Следует отметить, что данная автокорреляционная функция является усреднением большого числа импульсов ( $\sim 10^8$  в режиме автоQML и  $\sim 10^6$  в режиме QML), поскольку каждое измерение занимало  $\sim 1$  мин. Длительность импульсов может изменяться от цуга к цугу; кроме того, может меняться количество импульсов на аксиальном периоде [12]. В работе [13] рассмотрен случай импульсов непостоянной длительности, в результате автокорреляционные функции принимали экспоненциальную форму. Поэтому в настоящей работе определение точной длительности импульсов в режимах автоQML и QML по автокорреляционным функциям представляется затруднительным. Отметим, что ранее длительность

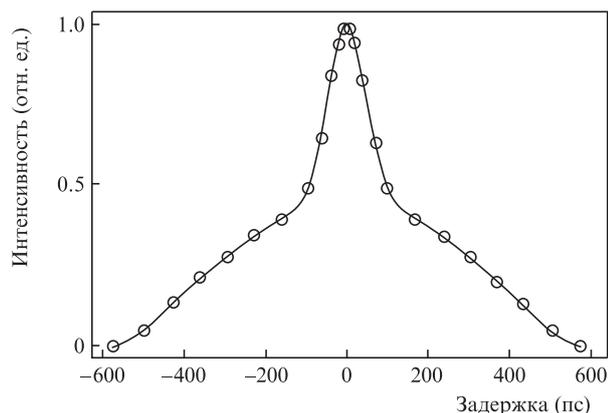


Рис.5. Автокорреляционная функция в автоQML-режиме при  $\Delta L \approx 100$  мкм и  $k_d = 2.5\%$ .

импульсов в режимах автоQML и QML была измерена стрик-камерой [5, 12].

На рис.5 приведена автокорреляционная функция импульсов в автоQML-режиме при  $k_d = 2.5\%$  и  $\Delta L \approx 100$  мкм. Видно, что при отстройке длины резонатора происходило сильное уширение краев автокорреляционной функции по сравнению с автоQML-режимом при  $k_d = 10\%$  и  $\Delta L = 0$ . Это может говорить о возникновении нескольких импульсов на аксиальном периоде лазера, что и наблюдалось ранее в работе [5]. Аналогичное уширение автокорреляционной функции при отстройке имело место и в QML-режиме.

Полученное различие длительностей импульсов при разной поляризации света в резонаторе можно объяснить астигматизмом светового пучка. Согласно матричному расчету резонатора диаметр пучка в центре АОМ в горизонтальной плоскости вследствие астигматизма в 1.2 раза шире, чем в перпендикулярной плоскости. Для проверки влияния астигматизма был собран резонатор без астигматизма. В этом случае длительности генерируемых импульсов при ||-поляризации и  $\perp$ -поляризации совпали.

Средняя выходная мощность лазера ( $P_{out}$ ) в режиме CWML составляла 1 Вт. В случае, когда автоQML-режим обеспечивался путем отстройки длины резонатора, уменьшения выходной мощности не замечено. При работе лазера в автоQML-режиме путем увеличения  $k_d$  выходная мощность снижалась до 620 мВт из-за увеличения дифракционных потерь. В QML-режиме  $P_{out} = 580$  мВт. Снижение средней мощности в QML-режиме при низких частотах модуляции добротности отражает известную

тенденцию (см., напр., [14]) и связано с увеличением перекачки полезной мощности возбуждения в спонтанное излучение.

#### 4. Заключение

В заключение отметим, что предложенный для увеличения пиковой мощности импульсов метод СЗАОМ позволяет получать генерацию как в QML-, так и в автоQML- и CWML-режимах. Наиболее короткие импульсы ( $\sim 50$  пс) получены в QML-режиме. АвтоQML-режим может быть реализован как за счет изменения дифракционной эффективности АОМ, так и при отстройке межмодового интервала лазера от удвоенной частоты бегущей звуковой волны модулятора ( $\Delta\nu \approx 5-30$  кГц). Форма автокорреляционной функции импульсов изменяется при переходе от CWML-режима к режимам автоQML и QML. Наиболее сильное искажение формы автокорреляционной функции происходит при отстройке межмодового интервала лазера от удвоенной частоты бегущей звуковой волны модулятора. Последнее объясняется возникновением нескольких импульсов на аксиальном периоде лазера. Также отмечено, что длительность импульсов выходного излучения зависит от астигматизма светового пучка (при меньшем диаметре пучка в направлении распространения звуковой волны АОМ генерировались более короткие импульсы).

1. Донин В.И., Яковин Д.В., Грибанов А.В. *Квантовая электроника*, **42**, 107 (2012) [*Quantum Electron.*, **42**, 107 (2012)].
2. Donin V.I., Yakovin D.V., Griбанov A.V. *Opt. Lett.*, **37**, 338 (2012).
3. Донин В.И., Яковин Д.В., Грибанов А.В. Патент РФ № 2478242 от 27.03.2013.
4. Донин В.И., Яковин Д.В., Грибанов А.В., Яковин М.Д. *Оптический журнал*, **85**, 8 (2018).
5. Донин В.И., Яковин Д.В., Грибанов А.В. *Письма в ЖЭТФ*, **101**, 881 (2015).
6. Eichler H.J. *Opt. Commun.*, **56**, 351 (1986).
7. Maciel A.C., Maly P., Ryan J.F. *Opt. Commun.*, **61**, 125 (1987).
8. Kean P., Smith K., Sibbett W. *Opt. Commun.*, **61**, 129 (1987).
9. Наний О.Е. и др. *Квантовая электроника*, **47**, 1000 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 1000 (2017)].
10. McDuff O., Harris S. *IEEE J. Quantum Electron.*, **3**, 101 (1967).
11. Hjelme D.R., Mickelson A.R. *IEEE J. Quantum Electron.*, **28**, 1594 (1992).
12. Донин В.И., Яковин Д.В., Грибанов А.В. *Квантовая электроника*, **45**, 1117 (2015) [*Quantum Electron.*, **45**, 1117 (2015)].
13. Van Stryland E.W. *Opt. Commun.*, **31**, 93 (1979).
14. Донин В.И., Никонов А.В., Яковин Д.В. *Квантовая электроника*, **34**, 930 (2004) [*Quantum Electron.*, **34**, 930 (2004)].