

# Планарный Хе-лазер с непрерывной высокочастотной накачкой

А.П.Минеев, А.П.Дроздов, С.М.Нефедов, П.П.Пашинин, П.А.Гончаров, В.В.Киселев

*Исследованы характеристики излучения планарного Хе-лазера, возбуждаемого поперечным высокочастотным (ВЧ) разрядом на частоте 40.68 МГц с диффузионным охлаждением активной среды и неселективным оптическим резонатором. Экспериментально изучены спектральные и мощностные характеристики Хе-лазера в зависимости от ширины межэлектродного зазора (1.4–2.5 мм), состава и давления рабочей смеси газов (30–100 Тор), удельной вкладываемой ВЧ мощности (0.4–34 Вт/см<sup>3</sup>) и температуры электродов. Показано, что при межэлектродном расстоянии более 1.6 мм выходная мощность лазерного излучения уменьшается. Пороговая мощность накачки составила 12 Вт (удельная мощность 0.4 Вт/см<sup>3</sup>). Добавка в рабочую смесь газообразного бутана приводит к увеличению выходной мощности примерно на 50% при межэлектродном расстоянии 2.0–2.5 мм. Достигнуты непрерывная мощность генерации 4 Вт и максимальная эффективность ~0.7%. Показана перспективность использования излучения Хе-лазера на длинах волн 2.03, 2.65 и 3.51 мкм.*

**Ключевые слова:** планарный волноводный Хе-лазер, высокочастотный разряд, спектральные характеристики, диффузионное охлаждение, молекулярные ионы.

## 1. Введение

В последнее время возрос интерес к созданию лазерных систем различного назначения, работающих в условно-безопасном для глаз спектральном диапазоне 1.3–3.5 мкм. Это обусловлено широкими возможностями применения приемно-передающих устройств для данного диапазона как в научных исследованиях, так и в прикладных областях (лидарные комплексы, дальномеры, медицинские приборы). Отметим, что в настоящее время активно проводятся работы по созданию твердотельных лазеров на основе кристаллов  $\text{Ho:YAG}$ ,  $\text{Tm:YLF}$ ,  $\text{Er:YLF}$  с диодной накачкой, генерирующих в этом диапазоне. Газовые лазеры имеют существенное преимущество перед твердотельными – высокую оптическую однородность активной среды, что позволяет применять оптические резонаторы большой длины и, как следствие, получать высокую направленность и высокую монохроматичность излучения. Среди большого числа таких газовых лазеров можно выделить следующие: обертоновый СО-лазер, иодный лазер с фотодиссоционной накачкой, позволяющий возбуждать огромные объемы и обеспечивающий рекордные энергии импульса излучения, и химические лазеры. Однако эти лазеры имеют ряд недостатков, например высокую агрессивность и/или токсичность компонентов активных сред лазеров или продуктов протекающих в них химических реакций (химические, иодные и СО-лазеры), большие трудности принципиального характера при создании лазеров замкнутого цикла (газодинамические лазеры). Таким образом, представляется весьма актуальным создание мощ-

ных лазерных систем, свободных от указанных недостатков и расширяющих диапазон генерируемых частот излучения большой мощности [1].

В настоящее время лазер на переходах атома ксенона считается одним из перспективных источников излучения в ближнем ИК диапазоне ввиду возможности использования больших объемов рабочей среды и высокой эффективности (свыше 1%). Хе-лазер, генерирующий излучение с длинами волн 1.73–3.6 мкм, работает в широких диапазонах давлений активной среды (0.05–14 атм) и удельных мощностей накачки (1 Вт/см<sup>3</sup>–10 кВт/см<sup>3</sup>) в импульсном и непрерывном режимах [2]. Для накачки Хе-лазеров используются электрический разряд, электронные пучки и ядерные реакции. Экспериментальному и теоретическому исследованию характеристик ксенонового лазера посвящено большое количество работ, однако статей о непрерывной высокочастотной (ВЧ) накачке ксенонового лазера не так много, и физические принципы его работы до конца не ясны.

В работе [3] было показано, что ВЧ накачка активной среды лазера на смеси газов Хе–Аг–Не при средних давлениях приводит к резкому (в  $\sim 10^3$  раз) возрастанию его мощности по сравнению с известными лазерами низкого давления, и поэтому он был отнесен к классу мощных лазеров. Последующие исследования, в частности лазеров с планарными активными средами (см., напр., [4, 5]), продемонстрировали перспективность использования Хе-лазеров с максимальной мощностью на длинах волн 2.03 и 2.65 мкм [6, 7].

Заселение рабочих уровней Хе-лазера при непрерывной ВЧ накачке и среднем давлении рабочей смеси газов происходит за счет наработки молекулярных ионов  $\text{ArXe}^+$  и  $\text{Xe}^{2+}$  с их последующей диссоциативной рекомбинацией [6]:



А.П.Минеев, А.П.Дроздов, С.М.Нефедов, П.П.Пашинин, П.А.Гончаров, В.В.Киселев. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: mineev@kapella.gpi.ru, drozdov@kapella.gpi.ru



подводилась к разрядному промежутку. На концах электродов были установлены корректирующие индуктивности.

### 3. Экспериментальные результаты

Экспериментальные исследования генерационных характеристик ксенонового лазера проводились с использованием лазерного излучателя с медными электродами при межэлектродных зазорах 1.4, 1.6, 2.0 и 2.5 мм, давлениях рабочей смеси газов 35–65 Тор и мощностях ВЧ накачки 150–350 Вт.

На рис.3 и 4 представлены зависимости выходной мощности лазера от ширины межэлектродного зазора при различных значениях вкладываемой в разряд мощности и давления рабочей газовой смеси соответственно. Видно, что выходная мощность лазера уменьшается при увеличении межэлектродного зазора (с уменьшением удельной вкладываемой в разряд мощности). Некоторое снижение выходной мощности лазера при ширине межэлектродного зазора 1.4 мм возможно связано с увеличением волноводных потерь, вызванных недостаточно качественной обработкой поверхностей электродов и их непараллельностью. Дальнейшие эксперименты проводились при ширине межэлектродного зазора 1.6 мм.

На рис.5 и 6 представлены зависимости выходной мощности лазера от вкладываемой в разряд мощности накачки и давления рабочей смеси соответственно. Из рис.5 видно, что с ростом мощности накачки растет и оптимальное давление рабочей смеси газов. При увеличении давления увеличивается наработка молекулярных ионов

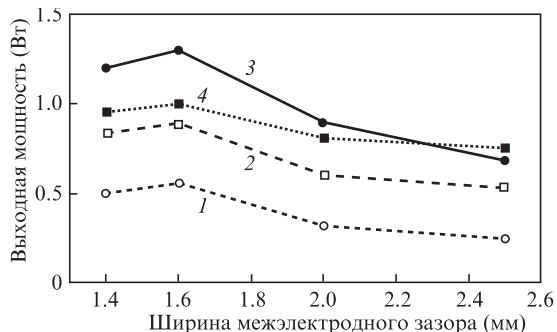


Рис.3. Зависимости выходной мощности лазера от ширины межэлектродного зазора при вкладываемой в разряд ВЧ мощности 150 (1), 250 (2, 4) и 350 Вт (3) для рабочих смесей Ar:He:Xe = 60:39:1 (1–3) и Ar:He:Xe:C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> = 59:39:1:1 (4) при давлении 50 Тор.

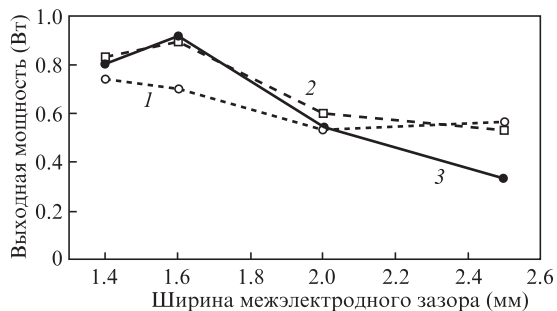


Рис.4. Зависимости выходной мощности лазера от ширины межэлектродного зазора для рабочей смеси Ar:He:Xe = 60:39:1 при давлении 35 (1), 50 (2) и 65 Тор (3) и вложенной в разряд мощности накачки 250 Вт.

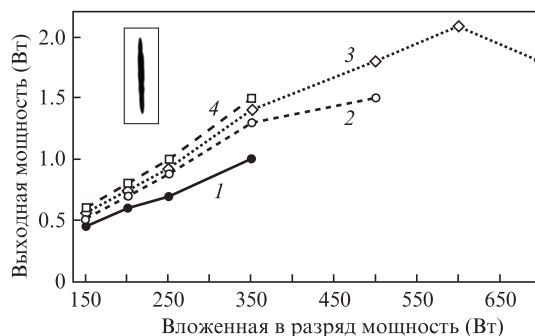


Рис.5. Зависимости выходной мощности лазера от вкладываемой в разряд мощности накачки для рабочих смесей Ar:He:Xe = 60:39:1 при давлении 35 (1), 50 (2) и 65 Тор (3) и Ar:He:Xe:C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> = 59:39:1:1 при давлении 50 Тор (4). На вставке — пятно, проявленное на термобумаге пучком излучения лазера с выходной мощностью 1 Вт. Ширина межэлектродного зазора 1.6 мм.

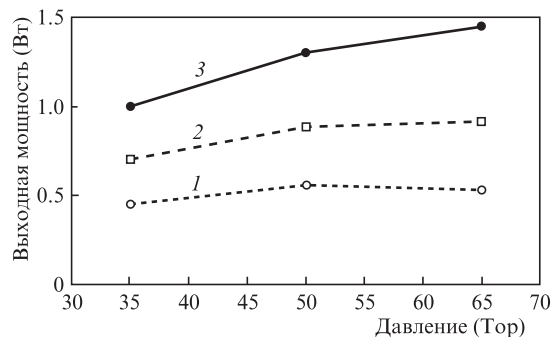


Рис.6. Зависимости выходной мощности лазера от давления рабочей смеси Ar:He:Xe = 60:39:1 при мощности накачки 150 (1), 250 (2) и 350 Вт (3) и ширине межэлектродного зазора 1.6 мм.

и, как следствие, заселение верхнего рабочего уровня при снижении мощности накачки на одну частицу. С другой стороны, увеличение мощности накачки приводит к росту концентрации и температуры электронов и, следовательно, к увеличению скорости перемешивания возбужденных уровней ксенона, т. е. к уменьшению эффективности лазера.

Для долговременной работы отпаянного ксенонового планарного лазера, кроме чистоты исходных газов, важен материал электродов. Быструю временную деградацию выходной мощности лазера связывают с десорбцией материала электрода в разряд [10]. Так, в лазерном излучателе с алюминиевыми электродами выходная мощность существенно уменьшалась в течение одной минуты его работы, в то время как применение кварцевых пластин, прикрывающих электроды, приводило к стабильной работе лазера в течение часа с почти постоянной (в пределах 10%) выходной мощностью [10, 11]. Нами были проведены эксперименты с использованием лазера с медными электродами, частично (со стороны разрядного промежутка) покрытыми слоем никеля толщиной ~5 мкм. (Как известно, никель широко применяется в электровакуумном приборостроении, что связано с низкой упругостью его паров и высокой температурой плавления.)

По сравнению с лазером с чисто медными электродами выходная мощность данного лазера на квазистабильном участке увеличилась в три раза, а время работы на этом участке возросло с 3 до 16 мин (рис.7). Уменьшение со временем выходной мощности может быть связано с



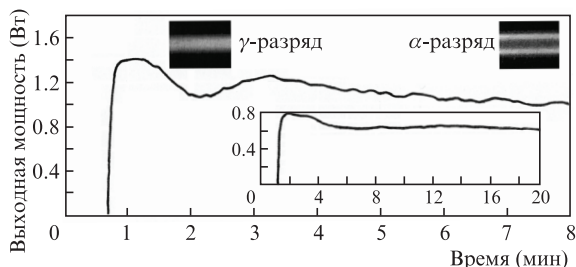


Рис.7. Временная зависимость выходной мощности лазера с электродами, покрытыми никелем, для рабочей смеси Ar:He:Xe = 60:39.5:0.5 при давлении 50 Тор и мощности накачки 250 Вт. На вставках представлены временная зависимость выходной мощности лазера при мощности накачки 150 Вт и фотографии  $\gamma$ - и  $\alpha$ -разрядов.

тем, что никелем покрыты только части электродов, а в процессе работы разряд «заполняет» на непокрытые участки электродов. Следует отметить, что максимальная выходная мощность ксенонового лазера достигается при горении разряда в так называемой  $\gamma$ -фазе, с течением времени мощность лазерного излучения уменьшается, а разряд перестраивается (вдоль разрядного промежутка появляются участки в виде  $\alpha$ -разряда, постепенно заполняющие электроды по всей длине) и переходит в  $\alpha$ -фазу. Таким образом, можно сказать, что в отличие от CO- и CO<sub>2</sub>-лазеров, для ксенонового лазера оптимальной является  $\gamma$ -фаза горения разряда.

Зависимости выходной мощности лазера с электродами, покрытыми никелем, от вкладываемой в разряд мощности накачки представлены на рис.8. Пороговая мощность накачки была равна 12 Вт, а минимальная выходная мощность при превышении порога генерации – 4 мВт. Максимальная эффективность лазера была получена при добавке в рабочую смесь газов бутана и составила ~0.7%.

Представляет интерес влияние молекулярных добавок в рабочую смесь газов на выходную мощность лазера при непрерывной ВЧ накачке, поскольку этот вопрос рассматривался ранее только для случая импульсной накачки ксенонового лазера электронным пучком [12, 13]. В табл.1 приведены выходные мощности лазера на смеси газов Ar:He:Xe:M = 59:39:1:1 при давлении 50 Тор и использовании различных молекулярных добавок. Мощность

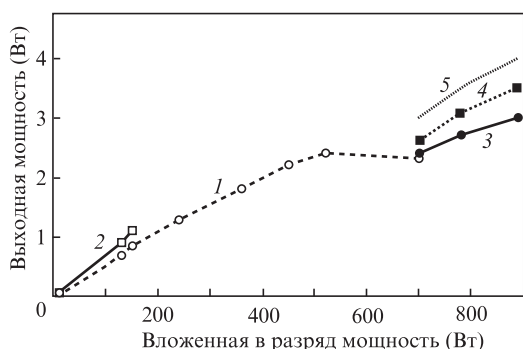


Рис.8. Зависимости выходной мощности лазера от вложенной в разряд мощности накачки для рабочих смесей Ar:He:Xe = 60:39.5:0.5 (1) и Ar:He:Xe:C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> = 59:39:0.5:0.5 (2) при давлении 50 Тор, Ar:He:Xe = 60:39.5:0.5 при давлении 90 Тор (3, 4) и Ar:He:Xe:C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> = 59:39:0.5:0.5 при давлении 90 Тор (5). Использовались выходное зеркало с многослойным диэлектрическим покрытием и пропусканием ~20% на рабочих длинах волн (1–3) и выходное зеркало (45%) – плоскопараллельная кремниевая пластина (4, 5). Ширина межэлектродного зазора 1.6 мм.

Табл.1. Влияние молекулярных добавок на выходную мощность Хе-лазера.

Добавка	Мощность (мВт)	Добавка	Мощность (мВт)
–	620	CO <sub>2</sub>	64
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	660	CH <sub>4</sub>	539
N <sub>2</sub>	528	CO	540
O <sub>2</sub>	75	H <sub>2</sub>	210

накачки составляла 160 Вт, межэлектродный зазор был равен 1.6 мм.

В работах [5, 6] показано, что физика разряда в Хе-лазере отличается от физики разрядов в планарных CO- и CO<sub>2</sub>-лазерах. Наиболее эффективно ВЧ накачка осуществляется в узких пристеночных областях (из-за градиента коэффициента преломления, связанного с тепловой неоднородностью плотности газа), составляющих относительно небольшую часть активной среды, причем разряд имеет очень низкий импеданс. Коэффициент усиления возле стенок больше, чем в середине разрядного промежутка. Это связано с меньшей концентрацией электронов, что увеличивает усиление из-за уменьшения столкновительного перемешивания лазерных уровней электронным ударом [6].

Добавка в рабочую лазерную смесь газообразного бутана существенно увеличивает выходную мощность Хе-лазера при большом межэлектродном зазоре (более 1.6 мм). Этот эффект, с одной стороны, связан, по-видимому, с перестройкой разряда, приводящей к более равномерному распределению удельной мощности излучения по сечению лазерного пучка, а с другой – обусловлен уменьшением температуры электронов, что увеличивает скорость рекомбинации и, возможно, скорость очистки нижнего лазерного уровня в атомах Хе [12]. Наибольшая эффективность использования бутана в качестве добавки может быть связана с большой энергией, необходимой для разрыва связей молекулы бутана.

На рис.9 представлена зависимость выходной мощности лазера от содержания ксенона  $\epsilon$  в рабочей смеси Ar:He:Xe = 60:39: $\epsilon$  при давлении 50 Тор и вкладываемой в разряд мощности накачки 150 Вт.

В рабочих смесях Хе-лазера содержание ксенона обычно достаточно мало. Наличие оптимума по содержанию Хе связано с двумя конкурирующими процессами. При увеличении содержания Хе, с одной стороны, возрастает наработка молекулярных ионов ксенона (с дальнейшей их диссоциативной рекомбинацией, которая приводит к заселению верхнего лазерного уровня), а с другой – увеличивается скорость тушения верхних рабочих уровней атомами Хе.

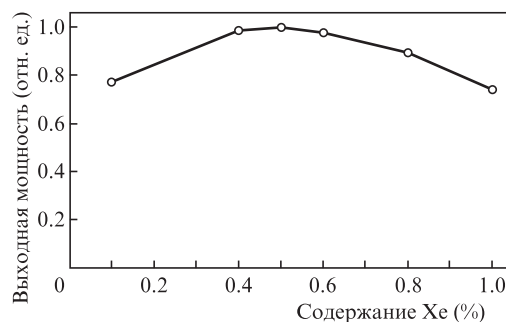


Рис.9. Зависимость выходной мощности Хе-лазера от содержания ксенона.

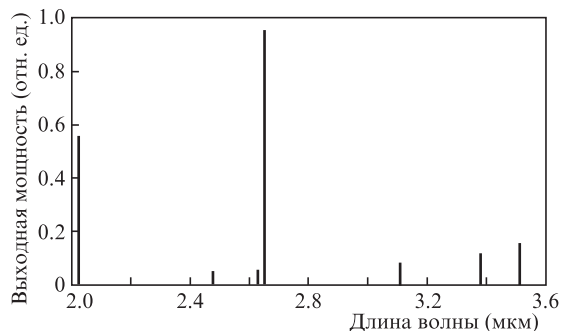


Рис. 10. Спектр излучения Хе-лазера для рабочей смеси Ar : He : Хе = 60 : 39 : 1 при давлении 50 Тор, мощности накачки 130 Вт и ширине межэлектродного зазора 1.4 мм.

Изменение содержания Хе вызывает перераспределение выходной мощности лазера по длинам волн линий излучения. Так, при электронно-пучковой накачке [2] и атмосферном давлении рабочей смеси газов увеличение содержания Хе приводит к тому, что начинают доминировать линии с  $\lambda = 3.37$  и  $3.51$  мкм, соответствующие переходам, верхние уровни которых заселяются с вышележащих состояний. В наших экспериментах при непрерывной накачке и средних давлениях рабочей смеси увеличение содержания Хе от 0.5% до 3% вызывает увеличение интенсивностей линий с  $\lambda = 2.03$  и  $3.51$  мкм и уменьшение интенсивностей линий с  $\lambda = 2.65$  и  $3.37$  мкм.

На рис. 10 представлен спектр излучения Хе-лазера. Генерация происходит на семи длинах волн переходов атома ксенона 5d–6p. Максимум выходной мощности приходится на  $\lambda = 2.65$  мкм (переход  $5d[3/2]_1 - 6p[1/2]_0$ ). Нормированные мощности лазерного излучения на длинах волн 2.03, 2.48, 2.63, 2.65, 3.11, 3.37 и 3.51 мкм равны соответственно 0.58, 0.048, 0.051, 1.00, 0.076, 0.112 и 0.16.

Следует отметить наличие генерации на линиях с  $\lambda = 2.48$  и  $3.11$  мкм лазерных переходов, имеющих общий верхний уровень  $5d[3/2]_3$ , которые обычно отсутствуют в спектрах излучения лазеров с импульсной накачкой, и отсутствие генерации на линии с  $\lambda = 1.73$  мкм, присутствующей в спектрах излучения импульсных лазеров. Кроме того, изменяя соотношение компонентов рабочей смеси газов, можно осуществлять перераспределение выходной мощности лазера по длинам волн линий излучения [11].

Максимальная выходная мощность 4 Вт была получена при вкладываемой в разряд мощности накачки 890 Вт, что соответствует удельной мощности накачки  $34 \text{ Вт/см}^3$ . Это значение уступает удельным мощностям накачки 88 и  $67 \text{ Вт/см}^3$ , достигнутым в работах [5] и [11] соответственно. К сожалению, дальнейшее увеличение мощности накачки приводило, в связи с конструкционными особенностями, к горению разряда не только между электродами, но и между внутренними элементами лазерного излучателя, в частности около верхней крышки, выполненной из оргстекла, что сразу же вызывало деградацию рабочей смеси.

Охлаждение электродов разряда до температуры  $-50^\circ\text{C}$  с использованием в качестве хладагента этилового спирта практически не сказалось на выходной мощности и времени стабильной работы лазера.

#### 4. Выводы

1. Пороговая мощность накачки Хе-лазера составила менее 12 Вт (удельная мощность  $0.4 \text{ Вт/см}^3$ ), что свидетельствует о большом коэффициенте усиления активной среды (о низком пороге генерации).

2. Выходная мощность лазера уменьшается при увеличении межэлектродного зазора (при уменьшении удельной вкладываемой в разряд мощности)

3. Покрытие электродов никелем приводит к увеличению выходной мощности лазера на квазистабильном участке в три раза, а время работы на этом участке возрастает с 3 до 16 мин.

4. Добавка бутана в рабочую смесь газов увеличивает выходную мощность лазера. Это особенно заметно при увеличении ширины межэлектродного зазора.

5. Получена генерация на семи длинах волн в спектральном диапазоне 2.03–3.51 мкм. Максимум выходной мощности приходится на длину волны 2.65 мкм.

6. Максимальная выходная мощность 4 Вт получена при вложенной в разряд мощности накачки 890 Вт.

7. Охлаждение электродов до температуры  $-50^\circ\text{C}$  практически не сказалось на выходной мощности и времени стабильной работы лазера.

8. Для ксенонового лазера оптимальной является  $\gamma$ -фаза горения разряда.

1. Холин И.В. *Квантовая электроника*, **33**, 129 (2003).
2. Карелин А.В., Симакова О.В. *Квантовая электроника*, **34**, 129 (2004).
3. Udalov Yu.B., Peters P.J.M., Heeman-Ilieva M.B., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **63**, 721 (1993).
4. Tskhai S.N., Udalov Yu.B., Peters P.J.M., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 801 (1995).
5. Vitruk P.P., Morley R.J., Baker H.J., Hall D.R. *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 1366 (1995).
6. Илюхин Б.И., Очкин В.Н., Цхай С.Н., Кочетов И.В., Напартович А.П., Витteman В.Я. *Квантовая электроника*, **25**, 512 (1998).
7. Минеев А.П., Нефедов С.М., Пашинин П.П., Гончаров П.А., Киселев В.В., Дроздов А.П. *Вестник Казанского государственного технологического университета*, № 15, 40 (2011).
8. Минеев А.П., Нефедов С.М., Пашинин П.П. *Квантовая электроника*, **36**, 656 (2006).
9. Mineev A.P., Nefedov S.M., Pashinin P.P., Goncharov P.A., Kiselev V.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7994**, 799402 (2011).
10. Tskhai S.N., Udalov Yu.B., Peters P.J.M., Ochkin V.N. *Appl. Phys. B*, **62**, 11 (1996).
11. Blok F.J., Ochkin V.N., Shishkanov E.F., Tskhai S.N., Witteman W.J. *Appl. Phys. B*, **70**, 517 (2000).
12. Бункин Ф.В., Держиев В.И., Месяц Г.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **12**, 874 (1985).
13. Феденев А.В., Тарасенко В.Ф., Скакун В.С. *Квантовая электроника*, **32**, 449 (2002).