

МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ВКР-ЛАЗЕРА, ГЕНЕРИРУЮЩЕГО НЕСКОЛЬКО СТОКСОВЫХ КОМПОНЕНТ

П. А. Апанасевич*, В. А. Орлович, Г. И. Тимофеева

УДК 621.373.8;535.42

Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси,
220072, Минск, просп. Независимости, 68, Беларусь; e-mail: p.apanasevich@dragon.bas-net.by

(Поступила 6 апреля 2017)

Построена система соотношений, описывающая зависимость мощностей стоксовых компонент, генерируемых по отдельности или одновременно ВКР-лазером в стационарном режиме. На примерах генерации одной, двух и трех компонент показано, что, пользуясь этими соотношениями, можно сравнительно просто оптимизировать работу такой лазерной системы.

Ключевые слова: ВКР-генерация, ВКР-лазер, мощность накачки, стоксовы компоненты, эффективность генерации.

This paper presents a system of relationships describing the powers of the Stokes components, generated separately or simultaneously by a steady-state Raman laser. Using the generation of one, two, and three components as examples, it is shown that with the obtained relationships the operation of a laser system can be relatively simply optimized.

Keywords: SRS generation, Raman laser, pumping power, Stokes components, generation efficiency.

Введение. Вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) в настоящее время широко используется для преобразования частоты лазерного излучения. При этом для повышения эффективности преобразования нелинейная среда, в которой происходит ВКР-усиление стоксова излучения, как правило, помещается в резонатор, а исходное (преобразуемое) излучение используется как внешняя накачка, т. е. практически реализуется ВКР-лазер. В такой системе наряду с первой часто возникают стоксовы компоненты более высокого порядка [1—8]. Генерация одновременно нескольких компонент или генерация, например, второй компоненты с минимальными потерями на первую компоненту имеет большой практический интерес. Отсюда представляется важным развитие методов оптимизации эффективности генерации совместно или по отдельности нескольких стоксовых компонент. Пока нам известна лишь одна работа [8], в которой решается этот вопрос применительно к конкретному эксперименту.

В настоящей работе на основе уравнений переноса мощностей излучения в среде с комбинационно активным колебанием построены общие соотношения, описывающие зависимости эффективностей генерации нескольких стоксовых компонент ВКР-лазером в стационарном режиме от параметров нелинейной среды, коэффициентов отражения зеркал и внутренних потерь резонатора, мощности накачки. Пользуясь этими соотношениями, можно сравнительно просто подобрать такую комбинацию параметров, при которой ВКР-преобразователь частоты лазерного излучения работает максимально эффективно. Экспериментально стационарная генерация нескольких стоксовых компонент наблюдалась в работах [3—8].

Общие соотношения. Взаимодействие пучков излучения в активной среде ВКР-лазера, генерирующего в стационарном режиме n стоксовых компонент, при выполнении ряда условий [9—12] (прежде всего взаимодействующие пучки излучения имеют многомодовую структуру и их спек-

A METHOD FOR THE OPTIMIZATION OF A RAMAN LASER GENERATING SEVERAL STOKES COMPONENTS

P. A. Apanasevich*, V. A. Orlovich, G. I. Timofeeva (B. I. Stepanov Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus, 68 Nezavisimosti Prosp., Minsk, 220072, Belarus; e-mail: p.apanasevich@dragon.bas-net.by)

тральные ширины значительно меньше спектральной ширины колебательного перехода, на котором происходит ВКР) может быть описано системой уравнений

$$\pm \partial P_i^\pm / \partial z = [g_i (P_{i-1}^+ + P_{i-1}^-) - g'_{i+1} (P_{i+1}^+ + P_{i+1}^-) - \kappa_i] P_i^\pm, \quad (1)$$

где $P_i^\pm$ — мощности накачки ($i=0$) и стоксовых компонент ($i=1, \dots, n$), распространяющихся вдоль оси z в направлении (+) или против (−) отсчета z ; g_i — коэффициенты ВКР-усиления, определенные с учетом поперечного перекрытия пучков, $g'_i = (v_i/v_{i-1})g_i$; v_i и κ_i — частота и коэффициент потерь в активной среде пучка i . В (1) надо полагать $P_{-1} = P_{n+1} = 0$ и практически всегда $g_{i+1} < g_i$.

В ВКР-лазере (рис. 1) мощности P_i^+ и P_i^- на зеркалах связаны соотношениями:

$$P_{i2}^- = R_{i2} P_{i2}^+, \quad i = 0, 1, \dots, n, \quad (2)$$

$$P_{01}^+ = T_{01} P_L + R_{01} P_{01}^-, \quad P_{i1}^- = R_{i1} P_{i1}^-, \quad i = 1, \dots, n, \quad (3)$$

где P_L — мощность накачки, падающей на входное зеркало; R_{i1}, R_{i2} — коэффициенты отражения на входном 1 и выходном 2 зеркалах; T_{01} — коэффициент пропускания накачки входным зеркалом. В условиях реального эксперимента положения зеркал и торцов активной среды обычно не совпадают. Поэтому, строго говоря, коэффициенты R_i и T_i должны определяться с учетом возможного отражения излучения на торцах активной среды и потерь в областях между торцами и зеркалами [13, 14].

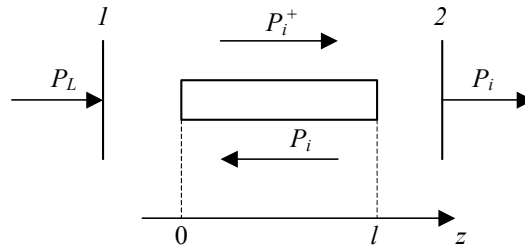


Рис. 1. Формальная схема рассматриваемого ВКР-лазера

Нетрудно показать, что из уравнений (1) с учетом условий на зеркалах получаются равенства

$$(1 - R_{01} R_{02} b^2) P_{01}^+ = T_{01} P_L, \quad (4)$$

$$G_i \bar{P}_{i-1} - G'_{i+1} \bar{P}_{i+1} - \gamma_i = 0, \quad i = 1, \dots, n-1, \quad (5)$$

$$G_n P_{n-1} - \gamma_n = 0, \quad G_{n+1} \bar{P}_n < \gamma_{n+1}. \quad (6)$$

Здесь $\bar{P}_i = \int (P_i^+ + P_i^-) dz / l$ — мощности, средние по длине активной среды l ; $G_i = g_i l$ и $G'_i = g'_i l$; $b = \exp(-G'_1 \bar{P}_1 - \kappa_0 l)$; $\gamma_i = \gamma'_i - (\ln R_{i1} R_{i2})/2$; $\gamma'_i = \kappa_i l$ — коэффициент полных внутренних потерь, включающий в себя дифракцию; $-(\ln R_{i1} R_{i2})/2$ — коэффициент полных потерь излучения i на зеркалах. Отсюда

$$\eta_i = (-\ln \sqrt{R_{i2}}) (\bar{P}_i / P_L) T_{i2} / (1 - R_{i2}) \quad (7)$$

имеет смысл эффективности генерации стоксовой компоненты i (здесь T_{i2} — коэффициент пропускания излучения i выходным зеркалом). В дальнейшем для краткости полагаем $T_{i2} = 1 - R_{i2}$.

Равенства (4)–(6) связывают между собой средние мощности. Наряду с этим в (4) входит мощность накачки в резонаторе на входе в активную среду со стороны входного зеркала P_{01}^+ . Во многих случаях с приемлемой точностью эта величина может быть выражена через среднее значение накачки в резонаторе $\bar{P}_0$. В частности, для этого можно воспользоваться соотношением

$$(1 - b)(1 + R_i b) P_{01}^+ = -g'_1 \int (P_1^+ + P_1^-) (P_0^+ + P_0^-) dz - \kappa_0 l \bar{P}_0, \quad (8)$$

полученным из (1) с учетом (2). В условиях реального эксперимента коэффициенты отражения зеркал на частоте первой стоксовой компоненты обычно имеют высокие значения. В этом случае, как показано в [13], величина $P_1^+ + P_1^-$ слабо зависит от z и может быть заменена на среднюю мощность $\bar{P}_1$. В результате из (8) и (4) получаем соотношение

$$\frac{(1 - R_{01} R_{02} b^2) (G_1 \bar{P}_1 + \kappa_0 l)}{(1 - b)(1 + R_2 b)} \bar{P}_0 = T_{01} P_L, \quad (9)$$

жестко связывающее средние мощности накачки в резонаторе $\bar{P}_0$ и первой стоксовой компоненты $\bar{P}_1$ с мощностью накачки на входе в резонатор P_L . Напомним $b = \exp(-G'_1 \bar{P}_1 - \kappa_0 l)$.

Равенства (5), (6) и (9) образуют замкнутую относительно средних мощностей в резонаторе систему, позволяющую анализировать зависимость энергетических характеристик n генерируемых одновременно или в отдельности стоксовых компонент от параметров активной среды, резонатора и мощности накачки. В частности, из (5) и (6) следует, что при четном n мощности всех нечетных компонент полностью определяются коэффициентами потерь четных компонент и не зависят от мощности накачки. В этом случае мощность накачки в резонаторе $\bar{P}_0$, а следовательно, четных компонент определяется равенством (9) при заданных $\bar{P}_1$. Наоборот, при нечетном n от мощности накачки P_L , падающей на резонатор, не зависят мощности четных компонент и средней накачки в резонаторе $\bar{P}_0$. В этом случае уравнение (9) определяет зависимость мощности первой и с учетом (5) мощностей других нечетных стоксовых компонент от накачки P_L при заданных $\bar{P}_0$.

Воспользуемся полученной системой соотношений для анализа зависимости эффективности ВКР-генерации от параметров резонатора и накачки в простейших случаях.

Генерация первой стоксовой компоненты. В этом случае, как следует из (6), при $n = 1$ средняя мощность накачки в резонаторе $\bar{P}_0 = \gamma_1/G_1$ и равенство (7) для эффективности генерации удобно записать в виде

$$\eta_1 = (-\ln R_{12}) \frac{y - \kappa_0 l}{2G_1' P_L}, \quad (10)$$

в котором мощность стоксовой компоненты выражена через безразмерный параметр $y = \bar{P}_1 G_1' + \kappa_0 l$, определяемый уравнением (9) при заданном $\bar{P}_0$, т. е. уравнением

$$\frac{[1 - R_{01} R_{02} \exp(-2y)]y}{[1 - \exp(-y)][1 + R_{02} \exp(-y)]} = \frac{T_{01} P_L}{\bar{P}_0}, \quad (11)$$

где $\bar{P}_0 = \gamma_1/G_1$. Наряду с (11) параметр y должен удовлетворять условию $y < G_1' \gamma_2/G_2 + \kappa_0 l$ невозможности возникновения второй стоксовой компоненты. В двух предельных случаях решение уравнения (11) удается получить аналитически.

В припороговой области, т. е. при значениях y , допускающих разложение функции $\exp(-y)$ в ряд по степеням y и пренебрежение слагаемыми с y^2 (при $4y^2 \ll 1$), из (11) получаем:

$$y = \frac{2}{1 + R_{01}} \left(\frac{T_{01} P_L}{\bar{P}_0} - \frac{1 - R_{01}}{2} \right). \quad (12)$$

Для краткости (12) записано при $R_{02} = 1$, что реализуется, как правило, в эксперименте. Соответственно, соотношение (10) для эффективности генерации в этой области y имеет вид

$$\eta_1 = (-\ln R_{12}) \frac{T_{01}}{(1 + R_{01}) G_1' \bar{P}_0 P_L} (P_L - P_{1th}), \quad (13)$$

$$P_{1th} = \bar{P}_0 \gamma_0 / 2 T_{01} = \gamma_1 \gamma_0 / 2 T_{01} G_1, \quad (14)$$

P_{1th} — пороговая мощность генерации первой компоненты, определенная по внешней накачке; $\gamma_0 = 1 - R_{01} + \kappa_0 l(1 + R_{01})$ — коэффициент полных потерь накачки. В условиях реального эксперимента $\kappa_0 l \ll 1 - R_{01}$, $T_{01} \approx 1 - R_{01}$ и $P_{1th} \approx \gamma_1 / 2 G_1$. Соотношения (13) и (14) применимы в сравнительно узкой области мощностей накачек: от пороговой $P_{1th} \approx 0.5 \gamma_1 / G_1$ до $P_L = 1.4 P_{1th}$ с погрешностью $< 10\%$. В области применимости уравнений (1) и (9) выражение (14) можно считать точным (при $R_{02} = 1$).

Во втором предельном случае, т. е. при значениях y , при которых в (11) можно вообще пренебречь слагаемыми с $\exp(-y)$, параметр $y = T_{01} P_L / \bar{P}$ и эффективность генерации

$$\eta_1 = (-\ln R_{12}) \frac{\gamma_1 T_{01}}{\gamma_0 2 \gamma_1}. \quad (15)$$

С погрешностью $< 5\%$ эта формула применима при $P_L > 3 \gamma_1 / T_{01} G_1 \approx 6 P_{1th}$.

В области накачки от $1.4 P_{1th}$ до $6 P_{1th}$ анализ зависимости эффективности генерации от параметров резонатора и накачки должен проводиться на основании (10) и численного решения (11) при $\bar{P}_0 = \gamma_1 / G_1$.

Генерация двух стоксовых компонент. В этом случае из (5) и (6) следует

$$\bar{P}_1 = \gamma_2 / G_2, \quad \eta_1 = (-\ln R_{12}) \gamma_2 / 2 G_2 P_L, \quad (16)$$

$$\bar{P}_2 = (G_1 \bar{P}_0 - \gamma_1) / G_2', \quad (17)$$

где средняя мощность накачки в резонаторе $\bar{P}_0$ определяется формулой (9) при $\bar{P}_1 = \gamma_2 / G_2$. Если при этом $R_{02} = 1$, то для $\bar{P}_0$ из (9) получаем:

$$\bar{P}_0 = T_{01}P_L(1 - b^2)/y(1 - R_{01}b^2), \quad (18)$$

где $b = \exp(-y)$ и $y = \gamma_2 G_1'/G_2 + k_0 l$. С учетом (17) и (18) эффективность генерации второй стоксовой компоненты

$$\eta_2 = (-\ln R_{22}) \frac{(1 - b^2)T_{01}G_1}{2y(1 - R_{01}b^2)G_2'P_L} (P_L - P_{2th}), \quad (19)$$

где

$$P_{2th} = \frac{\gamma_1 y (1 - R_{01}b^2)}{T_{01}G_1(1 - b^2)} \quad (20)$$

— пороговое значение мощности накачки P_L , вызывающей генерацию второй стоксовой компоненты. Первое из равенств (16) по сути определяет порог генерации второй стоксовой компоненты по средней мощности первой компоненты в резонаторе.

Из простых соображений ясно, что порог генерации второй стоксовой компоненты должен быть выше порога генерации первой компоненты, рассчитанного по (14). Действительно, из (20) при $y = \gamma_2 G_1'/G_2 + k_0 l \ll 1$ получается соотношение

$$P_{2th} = P_{1th}(1 + \gamma_2 G_1'/G_2), \quad (21)$$

согласно которому расстояние между этими порогами при малых y пропорционально полным потерям второй компоненты $\gamma_2 = -\ln \sqrt{R_{21}R_{22}} + k_2 l$, включая ее выход из резонатора через выходное зеркало, пропорциональный $(-\ln \sqrt{R_{22}})$, т. е. генерацию. Входящее в (21) отношение $G_1'/G_2 = (v_1/v_0)(G_1/G_2)$ приближенно можно считать равным единице, так как $v_1/v_0 < 1$, $G_1/G_2 > 1$.

Таким образом, при генерации двух (или второй) стоксовых компонент средняя мощность первой стоксовой компоненты, как видно из (16), жестко фиксирована потерями второй стоксовой компоненты γ_2 и эффективность ее генерации падает с ростом мощности накачки. Вся мощность накачки, превышающая порог P_{2th} , идет на генерацию второй компоненты. Чем меньше γ_2 , тем меньше эффективность генерации первой компоненты, так как ее мощность пропорциональна γ_2 . Для высокой эффективности генерации этой компоненты в рассматриваемом случае желательно, чтобы порог ее генерации был низким, а порог генерации второй компоненты по возможности высоким. Что же касается второй стоксовой компоненты, эффективность ее генерации сложно зависит от соотношения параметров резонатора и мощности накачки. При малых y , т. е. при $\gamma_2 G_1'/G_2 + k_0 l \ll 1$, и накачке P_L , существенно превышающей пороговое значение, эффективность генерации второй компоненты в соответствии с (19)

$$\eta_2 = (-\ln \sqrt{R_{22}})T_{01}G_1/(-\ln \sqrt{R_{22}} + \gamma_2')G_2', \quad (22)$$

где γ_2' — потери второй компоненты без учета ее выхода из резонатора через выходное зеркало. При использовании формулы (22) для анализа зависимости η_2 от R_{22} необходимо учитывать, что эта формула применима при $-\ln \sqrt{R_{22}} \ll 1$. В случаях, когда условие $\gamma_2 G_1'/G_2 + k_0 l \ll 1$ не выполняется, анализ зависимости эффективности генерации второй компоненты от параметров резонатора и накачки должен проводиться на основании соотношений (19) и (20).

На рис. 2 и 3 приведены зависимости эффективностей η_1 и η_2 от коэффициента отражения второй компоненты выходным зеркалом R_{22} и безразмерной мощности накачки $z = G_1 P_L$, рассчитанные по формулам (16) и (19) при $T_{01} = 1$, $R_{01} = 0$, $R_{11} = R_{21} = 1$, $G_2 = G_2' = G_1' = G_1$ и $\gamma_i' = 0.05$ для $i = 0, 1, 2$. Предположение, что все G равны G_1 , по существу означает, что полученные кривые имеют смысл эффективностей, рассчитанных по числам фотонов, а не по энергиям пучков. Эффективности генерации первой компоненты при $z < z_{2th} = G_1 P_{2th}$ определяются формулами (10) и (11). Видно также, что с ростом мощности накачки эффективность генерации первой стоксовой компоненты монотонно падает, а второй монотонно растет. Зависимость же эффективности генерации второй компоненты от R_{22} имеет максимум, а эффективность генерации первой компоненты монотонно понижается с ростом R_{22} . Кривые на рис. 2 соответствуют ситуациям, когда обе компоненты генерируются со сравнимой эффективностью. В частности, при $R_{22} = 0.1$ и $z = 0.22$ эти эффективности совпадают и равны $\sim 30^{00}$ каждая. Кривые на рис. 3 иллюстрируют случай, когда резонатор на частоте первой стоксовой компоненты практически закрыт. Тогда порог ее генерации предельно низок и она эффективно передает энергию накачки во вторую компоненту. При этом мощность первой компоненты в резонаторе при высоком пороге генерации второй может быть очень высокой.

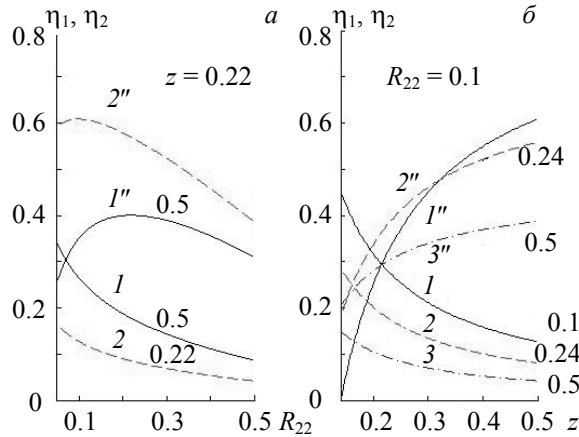


Рис. 2. Зависимость эффективностей генерации первой η_1 (1—3) и второй η_2 (1''—3'') компонент от коэффициента отражения R_{22} (a) и мощности накачки $P_L = z/G_1$ (б) при $R_{12} = 0.9$

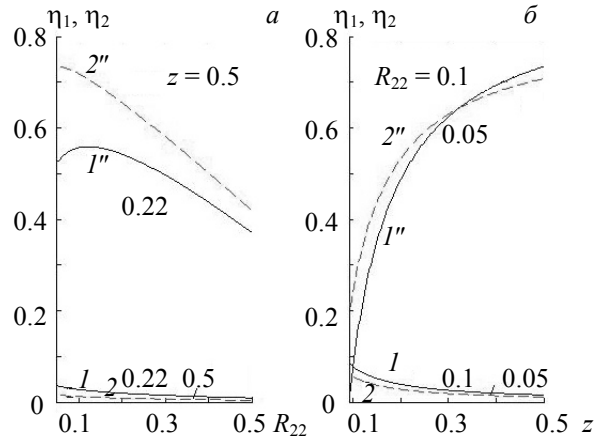


Рис. 3. Зависимость эффективностей генерации первой η_1 (1, 2) и второй η_2 (1'', 2'') компонент от коэффициента отражения R_{22} (a) и мощности накачки $P_L = z/G_1$ (б) при $R_{12} = 0.99$

Генерация трех стоксовых компонент. Из равенств (5) и (6) для накачки второй и третьей стоксовых компонент получаются выражения

$$\bar{P}_0 = (\gamma_3 G_2' / G_3 + \gamma_1) / G_1', \quad (23)$$

$$\bar{P}_2 = \gamma_3 / G_3, \quad \eta_2 = (-\ln R_{22}) \gamma_3 / 2 G_3 P_L, \quad (24)$$

$$\bar{P}_3 = (G_2 \bar{P}_1 - \gamma_2) / G_3', \quad (25)$$

а средняя мощность первой компоненты при $R_{02} = 1$ определяется из (11) при подстановке в него (23):

$$\frac{(1 - R_{01} b^2) y}{(1 - b^2)} = \frac{T_{01} P_L G_1}{(\gamma_3 G_2' / G_3 + \gamma_1)}, \quad (26)$$

где $y = G_1' \bar{P}_1 + k_0 l$, $b = \exp(-y)$. Соответственно, эффективность генерации первой стоксовой компоненты и в этом случае определяется формулой (10), а третьей — формулой

$$\eta_3 = (-\ln R_{22}) [(y - k_0 l) G_2 / G_1' - \gamma_2] / G_3' P_L \quad (27)$$

при значениях y , определяемых равенством (26). При малых $y = G_1' \bar{P}_1 + k_0 l \ll 1$, т. е. вблизи порога генерации первой стоксовой компоненты, эти формулы принимают вид

$$\eta_1'' = (-\ln R_{12}) \frac{T_{01}}{(1 + R_{01}) \bar{P}_0 P_L} (P_L - P_{1th}''), \quad (28)$$

$$P_{1th}'' = \bar{P}_0 \gamma_0 / 2 T_{01}, \quad (29)$$

$$\eta_3 = (-\ln R_{32}) \frac{T_{01} G_2}{(1 + R_{01}) G_1' G_3' P_0 P_L} (P_L - P_{3th}), \quad (30)$$

$$P_{3th} = (P_0 \gamma_0 / 2 T_{01}) [\gamma_0 + (1 + R_{01}) \gamma_2 G_1' / G_2], \quad (31)$$

где $\bar{P}_0$ определено равенством (23).

Таким образом, при генерации трех (или третьей) стоксовых компонент средние мощности второй компоненты и накачки в резонаторе жестко фиксированы потерями резонатора на частотах первой и третьей компонент (23) и (24) и не зависят от накачки на входе в резонатор. Эффективность генерации второй компоненты обратно пропорциональна мощности накачки P_L . Что же касается эффективности генерации первой и третьей компонент, то они довольно сложно зависят от мощности накачки P_L и потерь резонатора на всех частотах. В области накачек, удовлетворяющих условию $0 < P_L - P_{1th}'' < [2(1 + R_{01}) / \gamma_0] P_{1th}''$, они определяются соотношениями (28)—(31). Вне этой области анализ зависимости эффективности генерации первой и третьей компонент от параметров резонатора и накачки должен проводиться по формулам (10) и (25) с использованием решения уравнения (11) при $\bar{P}_0$, определенным равенством (23).

Заключение. Получены простые соотношения, позволяющие анализировать зависимость мощностей нескольких стоксовых компонент, генерируемых в отдельности или совместно ВКР-лазером в стационарном режиме, от параметров нелинейной среды, резонатора и мощности накачки. На основании этих соотношений детально проанализированы зависимости эффективностей генерации одной, двух и трех компонент от параметров резонатора. Показано, что в случае генерации нечетного числа компонент или нечетной компоненты мощности четных компонент и накачки в резонаторе не зависят от мощности накачки, падающей на резонатор, и полностью определяются параметрами резонатора на частотах нечетных компонент. Наоборот, при генерации четных компонент от мощности накачки не зависят мощности нечетных компонент. Приведенные соотношения применимы при выполнении условий, оговоренных в тексте.

- [1] П. А. Апанасевич, С. А. Батище, А. С. Грабчиков, А. А. Кузьмук, В. А. Лисинецкий, В. А. Орлович, Г. А. Татур, Р. В. Чулков. Журн. прикл. спектр., **73** (2006) 330—334 [P. A. Apanasevich, S. A. Batishche, A. S. Grabtchikov, A. A. Kouzmouk, V. A. Lisinetskii, V. A. Orlovitch, G. A. Tatur, R. V. Chulkov. J. Appl. Spectr., **73** (2006) 371—376]
- [2] В. А. Лисинецкий, Д. Н. Бусько, Р. В. Чулков, А. С. Грабчиков, П. А. Апанасевич, В. А. Орлович. Журн. прикл. спектр., **75** (2008) 284—290 [V. A. Lisinetskii, D. N. Busko, R. V. Chulkov, A. S. Grabtchikov, P. A. Apanasevich, V. A. Orlovich. J. Appl. Spectr., **75** (2008) 300—307]
- [3] А. С. Грабчиков, В. А. Лисинецкий, В. А. Орлович, М. Шмидт, С. Шлюкер, Б. Кюстнер, В. Кифер. Квант. электрон., **39** (2009) 624—626
- [4] W. Lubeigt, G. M. Bonner, J. E. Hastie, M. D. Dawson, D. Burns, A. J. Kemp. Opt. Express, **18** (2010) 16765—16770
- [5] R. Chulkov, V. Lisinetskii, O. Lux, H. Rhee, S. Schrader, H. J. Eichler, V. Orlovich. Appl. Phys. B, **106** (2012) 867—875
- [6] V. R. Supvadeepa, J. W. Nicolson. Opt. Lett., **338** (2013) 2538—2531
- [7] P. V. Shpak, S. V. Voitkov, R. V. Chulkov, P. A. Apanasevich, V. A. Orlovich, A. S. Grabtchikov, A. Kushwaha, N. Satti, L. Agrawai, A. K. Maini. Opt. Commun., **285** (2012) 3659—3664
- [8] R. J. Williams, D. J. Spence, O. Sux, R. P. Mildven. Opt. Express, **25** (2017) 749—757
- [9] П. А. Апанасевич. Весці АН БССР, сер. фіз.-мат. навук, № 4 (1965) 89—98
- [10] G. J. Kochen, W. H. Lowdermik. Phys. Rev., **A16**, N 4 (2009) 499—504
- [11] J. Leng, G. Sha, X. Hua, H. Yang, C. Zhang. Appl. Phys., **B82** (2006) 463—468
- [12] П. А. Апанасевич, В. И. Дашкевич, В. А. Орлович, Г. И. Тимофеева. Журн. прикл. спектр., **76**, (2009) 499—504 [P. A. Apanasevich, V. I. Dashkevich, V. A. Orlovitch, G. I. Timofeeva. J. Appl. Spectr., **76** (2009) 470—475]
- [13] П. А. Апанасевич, В. И. Дашкевич, Р. В. Чулков, Г. И. Тимофеева. Журн. прикл. спектр., **78** (2011) 580—587 [P. A. Apanasevich, V. I. Dashkevich, R. V. Chulkov, G. I. Timofeeva. J. Appl. Spectr., **78** (2011) 542—549]
- [14] П. А. Апанасевич, В. И. Дашкевич, Г. И. Тимофеева. Журн. прикл. спектр., **79** (2012) 733—737 [P. A. Apanasevich, V. I. Dashkevich, G. I. Timofeeva. J. Appl. Spectr., **79** (2012) 720—725]