

Характеристики рециркуляционного волоконного интерферометра при высокой частоте фазовой модуляции излучения

Э.И.Алексеев, Е.Н.Базаров, В.П.Губин, А.И.Сазонов, Н.И.Старостин, А.И.Усов

Экспериментально исследованы сигнальная чувствительность и обнаружительная способность рециркуляционного волоконного кольцевого интерферометра (РВКИ) при различных параметрах фазовой модуляции излучения и коэффициентах усиления внутрирезонаторного волоконно-оптического усилителя (ВОУ). Установлено, что при оптимальной амплитуде фазовой модуляции сигнальная чувствительность РВКИ с ВОУ на иттербий-эрбиевом волокне не зависит от частоты модуляции в широком диапазоне усиления, вплоть до предпорогового режима работы. При этом частота модуляции может значительно превышать ширину резонансных линий оптического резонатора, так что условие квазистатической модуляции не накладывает ограничения на чувствительность. Показано также, что выходные шумы РВКИ минимальны на частоте фазовой модуляции вблизи середины межмодового интервала, что объясняется фильтрацией избыточного шума суперфлуоресцентного волоконного источника (СВИ) в резонаторе. Сравнение с идеальным волоконным кольцевым интерферометром Саньяка показывает, что в идентичных условиях данный макет РВКИ имеет в 16 раз более высокую сигнальную чувствительность и в 4 раза лучшую обнаружительную способность, которая определяется избыточным шумом СВИ.

Ключевые слова: рециркуляционный интерферометр, волоконный усилитель, модуляционный метод.

Рециркуляционные волоконные кольцевые интерферометры (РВКИ) с внутрирезонаторным оптическим усилителем и широкополосным источником света [1–3] интенсивно изучаются в последние годы. Интерес к ним вызван их потенциально более высокой чувствительностью по сравнению с традиционным волоконным интерферометром (ВКИ) Саньяка. В РВКИ чувствительным элементом является высокодобротный кольцевой резонатор, в котором два пучка света циркулируют во встречных направлениях. В этих условиях может быть значительно повышена чувствительность к невязанному фазовому сдвигу, обусловленному измеряемой величиной (например, угловой скоростью).

Как известно, в кольцевых интерферометрах для регистрации выходного сигнала широко применяется «невязанная» гармоническая фазовая модуляция излучения, с помощью которой определяется знак вращения и устраняются низкочастотные шумы электроники. В общем случае высокая чувствительность РВКИ реализуется при определенных значениях частоты фазовой модуляции f_m и ее амплитуды ψ_m , которые могут зависеть от резкости F резонатора и длины L его периметра.

Согласно теоретической работе [1] с увеличением резкости, которое имеет место при компенсации потерь в резонаторе, необходимо уменьшать значения f_m и ψ_m так, чтобы выполнялось условие квазистатической модуляции $2\pi f_m F \tau \ll 1$, где τ – время обхода излучением периметра резонатора. Между тем наши предварительные эксперименты показали, что высокая чувствительность

РВКИ может быть получена и при невыполнении данного условия. В связи с этим одной из задач настоящей работы является экспериментальное исследование зависимости чувствительности РВКИ от различных параметров фазовой модуляции излучения и резкости резонатора. Еще одна задача работы состоит в экспериментальном исследовании спектра шума интенсивности излучения на выходе РВКИ, определяющего минимально обнаружимый невязанный фазовый сдвиг (предельную чувствительность) при модуляционном методе регистрации сигнала.

Эксперименты проводились на установке (рис.1), представляющей собой макет РВКИ с суперфлуоресцентным волоконным источником излучения (СВИ) и внутрирезонаторным волоконным оптическим усилителем (ВОУ) [2]. Оба эти элемента выполнены на основе активных волокон, легированных эрбием и иттербием, с рабочей длиной волны $\lambda = 1.55$ мкм. По основным параметрам установка аналогична использованной в [2]. В отли-

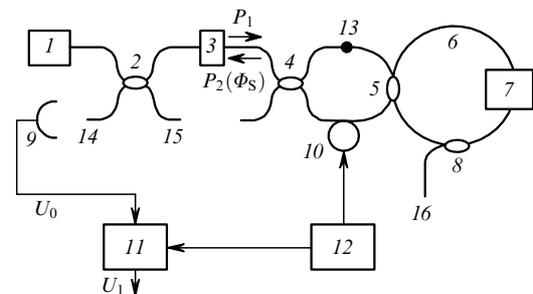


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1 – СВИ; 2, 4, 5, 8 – направленные ответвители; 3 – поляризатор; 6 – кольцевой резонатор; 7 – ВОУ; 9 – фотодиод; 10 – фазовый модулятор; 11 – фазовый детектор; 12 – генератор; 13 – место разъединения волокон; 14–16 – места включения фотодиода.

Э.И.Алексеев, Е.Н.Базаров, В.П.Губин, А.И.Сазонов, Н.И.Старостин, А.И.Усов. Фрязинское отделение Института радиотехники и электроники РАН, Россия, 141190 Фрязино, Московская обл., пл. Введенского, 1; http://fire.relarn.ru, e-mail: nis229@ire216.msk.su

Поступила в редакцию 19 июня 2003 г.

чие от [2] в оптической схеме установки предусмотрена возможность включения фотодиода для измерения шумов в различных режимах, а также возможность разъединения оптических волокон с целью создания однопольного режима волоконного кольца. Для измерения шума в этом режиме введен ответвитель δ с малой связью.

Экспериментально рассматривались два режима работы РВКИ, различающиеся резкостью резонатора: режим с малым усилением ВОУ и режим с максимально возможным усилением вблизи порога самовозбуждения, при котором, однако, сохранялась стабильная работа волоконного кольца. Как показано в [4], максимально возможное усиление ограничено неоднородностью спектра усиления ВОУ, которая определяет коэффициент передачи по амплитуде за один обход кольца $R = abfg$. Здесь $a = 0.98$ – полный амплитудный коэффициент передачи ответвителя δ , учитывающий вносимые потери; $b = 0.707$ – амплитудный коэффициент передачи прямого канала ответвителя δ ; $f = 0.468$ – амплитудный коэффициент пропускания кольцевого резонатора b с учетом потерь в волокне и в местах сварки; g – амплитудный коэффициент усиления ВОУ. Отметим, что прямой канал ответвителя δ является частью кольцевого резонатора.

Для иллюстрации рассматриваемых режимов и пояснения методики исследований на рис.2 представлены расчетные статические выходные характеристики РВКИ. Они представляют собой зависимость пропускания РВКИ от невязимой фазы Саньяка: $T(\phi_S) = P_2(\phi_S)/P_1$, где $P_2(\phi_S)$ и P_1 – мощность света на выходе и входе (см. рис.1); $\phi_S = k_\Omega \Omega$ – фазовый сдвиг Саньяка при одном обходе резонатора для одной волны (т. е. половина полного невязимого сдвига между встречными волнами за один обход); $k_\Omega = \pi LD/\lambda c = 0.34$ с – оптический масштабный коэффициент; Ω – измеряемая скорость вращения; $L = 200$ м – длина волокна; $D = 125$ мм – диаметр кольца. Для расчета использовано соотношение [1]

$$T(\phi_S) = T_1 + T_2 M_1 \frac{A_1(\phi_S)}{A_2(\phi_S)}, \quad (1)$$

где

$$T_1 = (ab)^2; \quad T_2 = a^2 \frac{(1-b^2)^2}{b^2}; \quad M_1 = \frac{h}{4}; \quad h = \frac{4R^2}{1-R^2}; \quad (2)$$

$$A_1(\phi_S) = 1 - R^2 + 0.5(h-2) \sin^2(\phi_S); \quad (3)$$

$$A_2(\phi_S) = 1 - R^2 + h \sin^2(\phi_S).$$

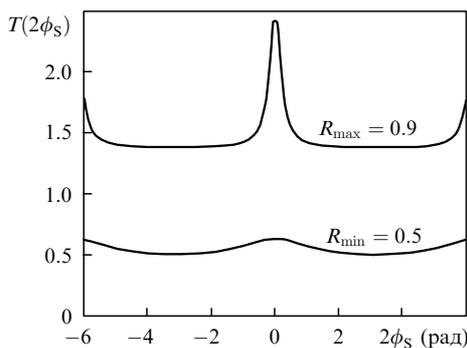


Рис.2. Статическая выходная характеристика РВКИ при разных R .

Отметим, что в (1) усиление в пределах спектральной полосы излучения источника предполагается постоянным, т. е. считается, что R не зависит от λ . При расчетах максимальное значение коэффициента передачи R_{\max} выбиралось для среднего по спектру значения g , вычисленного из экспериментального спектра ВОУ – СВИ по методике [4]. В нашем эксперименте $R_{\max} = 0.9$. Соответствующая этому режиму характеристика РВКИ представлена на рис.2. В режиме с малым усилением $R_{\min} \approx 0.5$. Из рис.2 следует, что при малом усилении характеристика РВКИ близка к характеристике однопроходного ВКИ Саньяка (однако имеет большую постоянную «подставку»), в то время как при большом усилении она имеет вид резкого пика в области малых невязимых фазовых сдвигов.

Сравним расчетные и экспериментальные параметры выходной характеристики для двух указанных режимов. Расчетные значения таковы: $T(0) = 2.51$ и 0.637 для $R_{\max} = 0.9$ и $R_{\min} = 0.5$ соответственно (рис.2). Экспериментальные значения постоянного напряжения U_0 на выходе фотоприемника (см. рис.1) равны 860 и 265 мВ для большого и малого усиления ВОУ. Измерения проводились при выключенной фазовой модуляции. Можно отметить удовлетворительное соответствие между расчетными и измеренными величинами, что наряду с представленными ниже другими данными свидетельствует о возможности использования модели из работы [1] для описания статических характеристик РВКИ.

Для определения сигнальной чувствительности РВКИ (величины отклика на малые вращения) использован подход [1], согласно которому сигнальная чувствительность S_{dc} определяется с помощью статической выходной характеристики как максимальное значение модуля ее первой производной: $S_{dc} = |dT(\phi_S)/d\phi_S|_{\max}$. Таким образом, чувствительность определяется как отношение приращения пропускания интерферометра к малому изменению невязимой фазы в точке перегиба статической характеристики интерферометра и выражается в рад^{-1} . Поскольку отклик РВКИ прямо пропорционален величине T_2 , зависящей от коэффициента деления ответвителя δ (см. рис.1), целесообразно использовать в качестве характеристики чувствительности нормированную величину S_{dc}/T_2 [1], где T_2 определяется из соотношения (2). Согласно указанному подходу расчетная чувствительность РВКИ, имеющего статические выходные характеристики, представленные на рис.2, составляет 14.63 и 0.33 рад^{-1} для $R_{\max} = 0.9$ и $R_{\min} = 0.5$ соответственно.

В эксперименте полезным сигналом является модуляционная компонента (на частоте f_m) мощности света на выходе РВКИ, амплитуда $P_{2ac}(\phi_S)$ которой при малых угловых скоростях Ω пропорциональна ϕ_S . С ее помощью можно определить переменную часть (приращение) коэффициента пропускания РВКИ $T_{ac}(\phi_S) = P_{2ac}(\phi_S)/P_1$. Можно показать, что $P_{2ac}(\phi_S) = k_1 U_1/k_U$, где U_1 – напряжение на выходе фазового детектора при наличии вращения; k_U – коэффициент передачи фазового детектора; $k_1 = \text{const}$. Величину P_1 можно оценить, измерив U_0 при выключенной накачке ВОУ. В этом режиме ВОУ сильно поглощает излучение и кольцевой резонатор оказывается практически разомкнутым. Можно показать, что в этих условиях $P_1 = k_1 U_0/b^2$. В соответствии с подходом [1] сигнальная чувствительность $S_{ac} = T_{ac}(\phi_S)\phi_S^{-1}$. Окончательно нормированная сигнальная чувствительность в

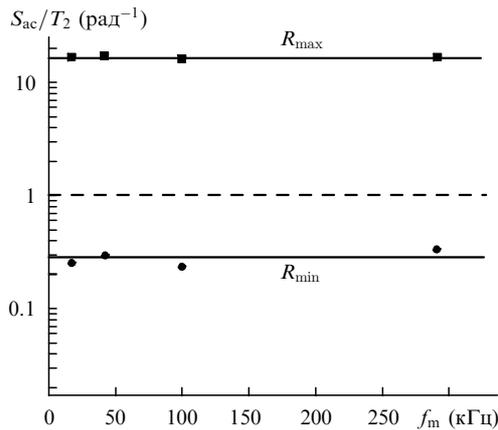


Рис.3. Зависимости сигнальной чувствительности РВКИ от частоты модуляции при R_{max} и R_{min} , а также расчетная чувствительность идеального однопроходового ВКИ Саньняка (штриховая кривая).

эксперименте определялась по формуле $S_{ac}/T_2 = [U_1 b^2 \times (U_0 k_U k_\Omega \Omega)^{-1}] / T_2$, где U_1 соответствует скорости вращения Ω , при которой выполнялся эксперимент; $U_0 = 200$ мВ; $T_2 = 0.4775$.

Измеренная частотная характеристика сигнальной чувствительности РВКИ представлена на рис.3 для большого и малого коэффициентов усиления ВОУ. Видно, что чувствительность в пределах погрешности измерений не зависит от частоты модуляции, причем ее среднее значение (сплошные линии) равно 16.58 и 0.282 для большого и малого усиления соответственно. Следует отметить, что измерения проводились для оптимальной амплитуды $\psi_{m\,opt}$ фазовой модуляции, при которой чувствительность максимальна. Величина $\psi_{m\,opt}$ зависит от усиления и частоты модуляции. Калибровка фазового модулятора проводилась в режиме малого усиления ВОУ по максимальному значению амплитуды $\psi_m = \pi/2$, при котором переменный сигнал на выходе РВКИ также максимален.

На рис.4 показана зависимость $\psi_{m\,opt}(f_m)$, измеренная при тех же двух значениях коэффициента передачи ВОУ. Видно, что для большого усиления оптимальная амплитуда при низкой частоте модуляции в 6 раз меньше, что указывает на сужение выходной характеристики, однако с повышением частоты модуляции $\psi_{m\,opt}$ увеличивается.

Отметим, что на рис.3 штриховой линией обозначена расчетная чувствительность $S_{ac}/T_2 = 1$ для идеального однопроходного ВКИ Саньняка, имеющего выходную ха-

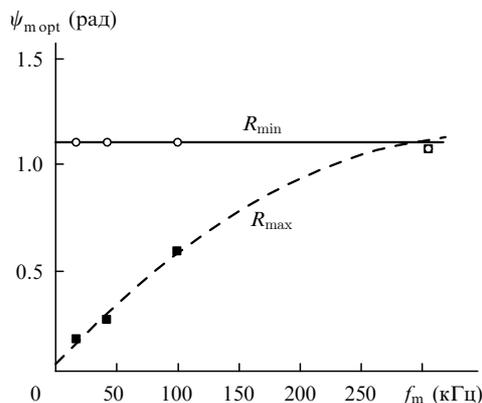


Рис.4. Зависимость оптимальной амплитуды фазовой модуляции от частоты при R_{max} и R_{min} .

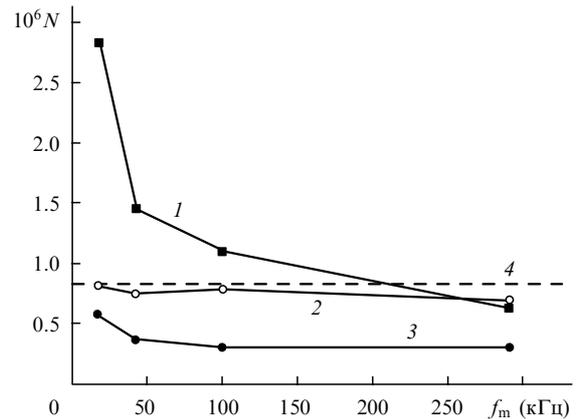


Рис.5. Спектры шумов на выходе РВКИ (1), шумов СВИ (2), электроники (3) и расчетных шумов СВИ (4).

рактеристику $T_s(\phi_S) = 1/2 [1 + \cos(2\phi_S)]$ [1]. Таким образом, данный макет РВКИ имеет выигрыш в 16 раз по сигнальной чувствительности.

Рассмотрим теперь шумовые характеристики РВКИ, с которыми связан минимально обнаружимый невязимый фазовый сдвиг (пороговая или предельная чувствительность РВКИ). Был измерен спектр относительного шума интенсивности излучения на выходе РВКИ в режиме с максимально возможным в данной установке коэффициентом передачи по кольцу $R_{max} = 0.9$. Результаты представлены на рис.5 (кривая 1). Для сравнения был измерен спектр относительного шума СВИ (кривая 2), при этом излучение детектировалось фотоприемником на выходе 15 (см. рис.1). Спектр шума электроники представлен кривой 3. Шумы определялись по формуле $N = (U_1/k_U)U_0^{-1}$, где U_1 – среднеквадратичное напряжение шума на выходе фазового детектора в полосе 1 Гц. На рис.5 показано также расчетное значение шума СВИ. Шум вычислялся по формуле

$$N = (N_1^2 + N_2^2 + N_3^2 + N_4^2 + N_5^2)^{1/2} = 8.38 \times 10^{-7}, \quad (4)$$

где

$$N_1 = \frac{R_d(2eqPB)^{1/2}}{U_0} = 7.13 \times 10^{-8};$$

$$N_2 = \frac{qPR_d\lambda[2B/(c\Delta\lambda)]^{1/2}}{U_0} = 8.35 \times 10^{-7};$$

$$N_3 = \frac{R_d(2ei_0B)^{1/2}}{U_0} = 2.84 \times 10^{-9};$$

$$N_4 = \frac{(4kTR_dB)^{1/2}}{U_0} = 1.64 \times 10^{-8};$$

$$N_5 = \frac{\rho B^{1/2}}{U_0} = 5.29 \times 10^{-9}; \quad U_0 = qPR_d;$$

$R_d = 15$ кОм – сопротивление на выходе фотодиода; $P = 90$ мкВт – средняя мощность света на фотодиоде; $B = 1$ Гц – полоса пропускания фотоприемника; $T = 290$ К – температура резистора; $i_0 = 10^{-7}$ А – темновой ток

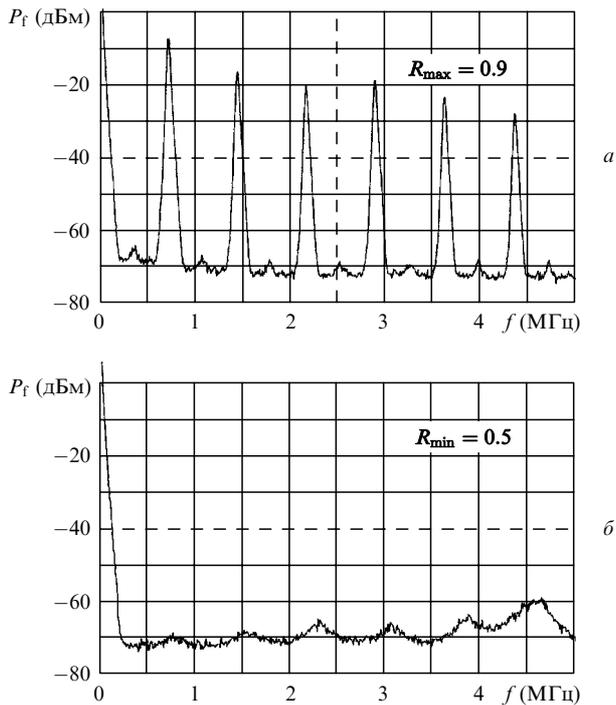


Рис.6. Спектр шума мощности излучения на выходе замкнутого кольцевого резонатора с одной волной при наличии (а) и в отсутствие (б) ВОУ. Полоса анализатора спектра 30 кГц.

фотодиода; $\lambda = 1.55$ мкм; $\Delta\lambda = 23$ нм – ширина спектра СВИ; $\rho = 5 \times 10^{-7}$ В·Гц $^{-1/2}$ – спектральная плотность шума электроники; $q = 0.7$ А/Вт – квантовая чувствительность фотодиода; e, c, k – заряд электрона, скорость света и постоянная Больцмана соответственно.

Далее с помощью анализатора спектра были измерены шумы при установке фотодиода в положение 1б для двух значений коэффициента передачи по кольцу при работе в однонаправленном режиме, что достигалось размыканием цепи в точке 1з (см. рис.1). Соответствующие спектры шумов приведены на рис.6. В первом случае ВОУ работал вблизи порога самовозбуждения (рис.6,а), во втором – был исключен из кольцевого резонатора (рис.6,б). Следует отметить, что этот эксперимент выполнялся при длине кольца 300 м.

Обсудим результаты проведенных экспериментов. Согласно теории [1] высокая чувствительность при модуляционном методе регистрации сигнала РВКИ ограничена областью низких частот, когда выполняется условие квазистатической модуляции $2\pi f_m F \tau \ll 1$. Здесь $F = \pi R \times (1 - R^2)^{-1} = v_{12} / \Delta v_r$ – резкость резонатора; v_{12} и Δv_r – межмодовый интервал и ширина линии резонатора. В условиях эксперимента при $R_{\max} = 0.9$ и $F = 15$ параметр $\tau = nL/c = 1$ мкс, так что вышеуказанное условие выполняется только при $f_m \ll 10$ кГц.

Фактическая независимость чувствительности РВКИ от частоты модуляции в условиях эксперимента может быть понята по аналогии с ситуацией, известной из области частотно-модуляционной спектроскопии спектральных линий поглощения с использованием узкополосного излучения [5]. РВКИ можно рассматривать как отражательный высокодобротный резонатор [6], который возбуждается излучением, состоящим из несущей и боковых полос, обусловленных фазовой модуляцией на входе резонатора.

В случае, когда частота модуляции достаточно высока, боковые полосы располагаются за пределами полосы пропускания резонатора и проходят на выход РВКИ без изменения. В то же время несущая, которая находится в пределах полосы резонатора, испытывает изменения по амплитуде и фазе, зависящие от величины расстройки относительно центральной частоты резонатора. Можно показать, что при этом будет происходить преобразование фазовой модуляции излучения в амплитудную, причем величина последней не ограничена условием квазистатической модуляции.

Интересно отметить, что в отличие от узкополосного случая такое поведение имеет место при взаимодействии широкополосного модулированного излучения с многократным резонатором.

Возрастание шума в области малых частот модуляции (вблизи нуля) вызвано усилением шумов СВИ на модах резонатора и преобразованием фазовых шумов СВИ в амплитудные при прохождении избыточного шума излучения через высокодобротный оптический резонатор [7]. На это указывают спектры шумов, измеренные в широком диапазоне частот в режиме с одной волной (рис.6). В этом режиме оптический резонатор не чувствителен к случайным внешним воздействиям, что повышает точность измерений. Видно, что при работе вблизи порога генерации (т. е. при высокой добротности резонатора) шумы подчеркиваются на частотах $f_m = 0, v_{12}, 2v_{12}, \dots$ (рис.6,а), кратных межмодовому интервалу.

Следует отметить, что небольшой подъем шума неизвестного происхождения наблюдается в областях между большими шумовыми пиками. Однако когда усиление в кольце отсутствует (рис.6,б), шум интенсивности становится близким к белому. Отметим, что для спектра рис.6,б пик в области вблизи нулевых частот имеет инструментальную природу, в то время как для спектра рис.6,а на инструментальный пик в этой области наложен реальный шумовой пик. Шум ВОУ (точнее, шум спектральных биений излучения источника и спонтанной эмиссии усилителя) в данных экспериментах был значительно ниже шума источника и не был выявлен.

Предельная чувствительность (минимально обнаружимый невзаимный фазовый сдвиг) РВКИ для данного макета ограничена значением менее 0.2 град/ч, которое вычисляется на основании измерений выходного шума и сигнальной чувствительности РВКИ. Это в 4 раза лучше расчетного значения предельной чувствительности идеального ВКИ Саньяка, которое при прочих равных условиях составляет 0.83 град/ч.

Таким образом, в настоящей работе экспериментально установлено, что при оптимальной амплитуде фазовой модуляции излучения сигнальная чувствительность РВКИ с ВОУ на иттербий-эрбиевом волокне не зависит от частоты модуляции в широком диапазоне усиления ВОУ, вплоть до предпорогового режима работы. Следует подчеркнуть, что частота модуляции может значительно превышать ширину резонансных линий оптического резонатора, так что условие квазистатической модуляции не накладывает ограничения на чувствительность. Экспериментально показано также, что выходные шумы РВКИ минимальны на частоте фазовой модуляции вблизи середины межмодового интервала, что объясняется фильтрацией избыточного шума СВИ в резонаторе. Сравнение с идеальным ВКИ Саньяка показывает, что в идентичных условиях данный макет РВКИ имеет в

16 раз более высокую сигнальную чувствительность и в 4 раза лучшую обнаружительную способность, которая определяется избыточным шумом СВЧ. Эти характеристики РВКИ могут быть улучшены, поскольку, в частности, они не ограничены шумами ВОУ.

Авторы благодарны В.П.Гапонцеву и И.Э.Самарцеву за поддержку работы и И.А.Андроновой за обсуждение результатов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минпромнауки (проект по теме 01.40.01.08.02) и РФФИ (грант № 00-02-17344).

1. Yu A., Siddiqui A.S. *IEEE Proc. J.*, **140**, 150 (1993).
2. Алексеев Э.И., Базаров Е.Н. и др. *Квантовая электроника*, **31**, 1113 (2001).
3. Hu Z., Ma X., Li F., Tang Q., Zhou S., Wu Y. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3860**, 348 (1999).
4. Базаров Е.Н., Губин В.П. и др. *Квантовая электроника*, **32**, 743 (2002).
5. Hall J.L., Hollberg L., Baer T., Robinson H.G. *Appl. Phys. Lett.*, **39**, 68 (1981).
6. Суханов И.И., Троицкий Ю.В. *Оптика и спектроскопия*, **50**, 952 (1981).
7. Kringlebotn J.T., Blotekjaer K. *J. Lightwave Tech.*, **12**, 573 (1994).