

РЕЖИМ СВЕРХСЛАБОЙ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКИ  
РУБИДИЕВОГО ДИСКРИМИНАТОРА ЧАСТОТЫ

Е. Б. Александров, А. К. Вершовский, Н. Н. Якобсон

Статья представляет экспериментальные подтверждения выдвинутому ранее [1, 2] рекомендациям по радикальному пересмотру режима оптической накачки рубидиевого стандарта частоты. Рекомендации сводились к уменьшению в десятки раз интенсивности накачки по сравнению с принятой практикой и имели целью резкое увеличение долговременной стабильности частоты стандарта без снижения кратковременной стабильности.

1. В работах [1, 2] было теоретически исследовано влияние интенсивности оптической накачки  $I$  на параметр качества  $\Phi(I)$  эталонного 0—0 резонанса в парах рубидия. Параметр качества, равный отношению амплитуды сигнала магнитного резонанса к его ширине<sup>1</sup> и среднеквадратичному уровню шума, определяет достижимую точность фиксации вершины резонанса и характеризует кратковременную стабильность частоты генератора, подстраиваемого в резонанс с эталонным переходом. В [1, 2] было показано, что оптимизированный по величине индуцирующего резонанс СВЧ поля  $H$  параметр качества  $\Phi(I)$  является однозначной функцией интенсивности накачки. Эта функция имеет один максимум, величина и положение которого зависят от эффективности накачки  $Q = (W_1 - W_2)/(W_1 + W_2)$ , где  $W_1$  и  $W_2$  — усредненные по объему ячейки скорости возбуждения атомов рубидия светом накачки с подуровней  $F=1$  и  $F=2$  основного состояния.

Выражение для  $\Phi(I)$  в [1, 2] было получено в предположении, что единственным источником шумов в сигнальном канале служат дробовые флуктуации тока фотоприемника. При этом в случае предельно эффективной накачки ( $Q=1$ ) максимум  $\Phi(I)$  достигается при относительной интенсивности  $I_0 = (W_1 + W_2)/2\gamma_0 = (\gamma - \gamma_0)/\gamma_0 = 1.16$ , соответствующей ширине резонанса  $\gamma$ , увеличенной световым возмущением в 2.16 раз по сравнению с темновой шириной  $\gamma_0$ .

Как отмечалось в [1, 2], это оптимальное значение интенсивности примерно на порядок ниже, чем практикуется в рубидиевых стандартах. Рекомендованное резкое снижение света накачки обещало не только повысить кратковременную стабильность частоты стандарта, но и линейно с падением интенсивности накачки снизить медленные уходы частоты, поскольку они в первую очередь определяются — прямо или косвенно — световыми возмущениями частоты 0—0 перехода.

2. Как показал эксперимент (см. ниже), предельный параметр качества, лимитированный дробовыми шумами фототока, при оптимальной интенсивности света  $I_0$  достигает  $10^3 \text{ Гц}^{-1} \cdot \text{с}^{1/2}$ . Однако такие высокие значения  $\Phi(I_0)$  не реализуются из-за амплитудно-фазовых флуктуаций СВЧ поля, индуцирующего 0—0 резонанс. Легко видеть, что флуктуации фазы, происходящие в окрестности удвоенной частоты  $\Omega$  сканирования резонанса, порождают в сигнальном канале шум  $N_\varphi$ , пропорциональный резонансу  $g(I) = \Phi(I) N_{\text{др}}$ , где  $N_{\text{др}}$  — дробовый шум фототока, т. е.

$$N_\varphi = k_1 \Phi(I) N_{\text{др}}, \quad (1)$$

<sup>1</sup> Здесь и далее под шириной подразумевается полуширина лоренцевой кривой резонанса на половине высоты.

$k_1$  — коэффициент пропорциональный средней случайной девиации частоты микроволнового поля.

Амплитудные флуктуации СВЧ поля с частотой в окрестности  $\Omega$  создают шумы  $N_a$  в сигнальном канале, пропорциональные амплитуде сигнала резонанса  $S(I) = g(I) \Gamma(I)$ , где  $\Gamma(I) = \sqrt{3} (1+I) \gamma_0$  — ширина резонанса с учетом светового и полевого уширения. Таким образом,

$$N_a = k_2 \Phi(I) N_{xp} \Gamma(I), \quad (2)$$

$k_2$  — коэффициент, пропорциональный глубине амплитудных флуктуаций.

При отсутствии корреляций фазовых и амплитудных флуктуаций полный шум  $N = \sqrt{N_{xp}^2 + N_{\varphi}^2 + N_a^2}$ , а параметр качества  $F(I)$  с учетом шумов СВЧ поля имеет вид

$$F(I) = \Phi(I) \left[ 1 + \left( \frac{N_{\varphi}}{N_{xp}} \right)^2 + \left( \frac{N_a}{N_{xp}} \right)^2 \right]^{-1/2}. \quad (3)$$

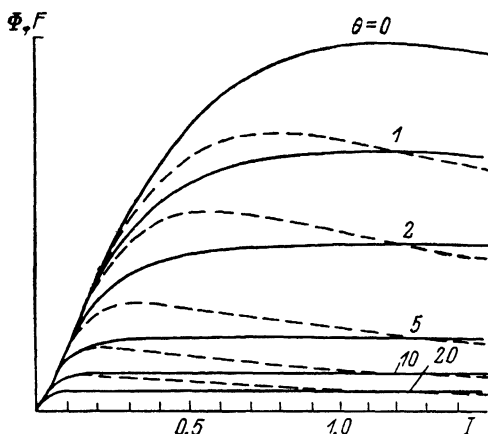


Рис. 1. Зависимость предельного  $\Phi(I)$  и реального  $F(I)$  фактора качества  $O-O$  резонанса от интенсивности оптической накачки  $I$ .

Используя выражения для  $N_{\varphi}$  и  $N_a$ , легко получить явный вид зависимости реального параметра качества  $F(I)$  от интенсивности накачки через известную ранее зависимость  $\Phi(I)$

$$F(I) = \Phi(I) [1 + \Phi^2(I) (k_1^2 + k_2^2 \cdot 3(1+I)^2 \gamma_0^2)]^{-1/2}. \quad (4)$$

Для удобства сопоставления с экспериментом выразим  $F(I)$  через легко измеряемые отношения шумов в сигнальном канале

$$F(I) = \Phi(I) \left[ 1 + \frac{\Phi^2(I)}{\Phi^2(I_0)} \left( \theta_1^2 + \theta_2^2 \frac{(1+I)^2}{(1+I_0)^2} \right) \right]^{-1/2}, \quad (5)$$

где

$$\theta_1 = \frac{N_{\varphi}(I_0)}{N_{xp}(I_0)} = k_1 \Phi(I_0), \quad \theta_2 = \frac{N_a(I_0)}{N_{xp}(I_0)} = k_2 \Phi(I_0) \Gamma(I_0).$$

На рис. 1 представлено семейство расчетных кривых  $F(I)$  при различных флуктуациях СВЧ поля. Сплошными линиями показан ход при наличии только фазовых флуктуаций, штриховыми — в случае чисто амплитудных флуктуаций. Верхняя кривая соответствует отсутствию флуктуаций СВЧ поля, т. е. совпадает с  $\Phi(I)$ . Из рис. 1 следует, что шумы СВЧ поля, уменьшая параметр качества, кроме того, существенно меняют его зависимость от интенсивности накачки, делая целесообразным ее дальнейшее снижение относительно значения  $I_0$ , оптимального при отсутствии таких шумов.

Конкретные рекомендации зависят от качества применяемого генератора и системы умножения и синтеза частот.

3. Высказанные выше положения были детально проверены экспериментально. Установка была собрана по стандартной схеме [3]. Резонанс возбуждался в парах рубидия в цилиндрической кювете  $55 \times 55$  мм в смеси с аргонном и азотом с соотношением парциальных давлений  $0.55 : 1$  при суммарном давлении 5 Тор. Темновая ширина  $\gamma_0$  резонанса составляла 29 Гц при температуре  $44^\circ\text{C}$ . Свет накачки от лампы с  $^{87}\text{Rb}$  фильтровался кюветой с парами  $^{85}\text{Rb}$  в смеси с азотом при давлении 125 Тор. Температура фильтра  $60^\circ\text{C}$  соответствовала эффективности накачки  $Q \approx 0.6$ .

Для записи формы линии резонанса применялась медленная протяжка частоты СВЧ поля одновременно с его стопроцентной амплитудной модуляцией. Относительная интенсивность накачки  $I$  определялась по величине светового уширения резонанса. При каждом значении интенсивности производилась оптимизация напряженности микроволнового поля.

На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости  $\Phi(I)$  и  $F(I)$ . Для определения  $\Phi(I)$  измерялись амплитуда и ширина резонанса, а также шумы сиг-

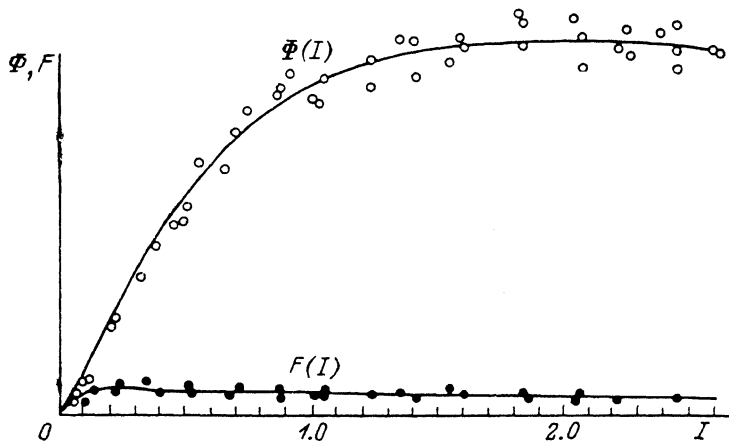


Рис. 2. Теоретическая (сплошные линии) и экспериментальная (точки) зависимости  $\Phi(I)$  и  $F(I)$ .  $Q=0.66$ ,  $\theta_1=\theta_2=11$ .

нального тракта при выключенном СВЧ поле. Эти шумы определялись дробовым шумом фототока. Измерения  $F(I)$  проводились аналогично, но шумы измерялись при включенном СВЧ поле. На рис. 2 результаты измерений нанесены точками. Их разброс связан с разбросом реализаций при измерении шумов. Сплошными линиями приведены расчетные зависимости  $\Phi(I)$  и  $F(I)$ . Подгоночными параметрами служили максимальные значения функций. Соотношение  $\theta_1/\theta_2$  получено измерением шумов при выключенной протяжке частоты СВЧ поля.

При настройке СВЧ на вершину резонанса проявляются только амплитудные флуктуации поля. Фазовые флуктуации дают максимальный вклад в шумы при настройке на склон резонанса в точке максимальной крутизны. По этим измерениям найдено, что  $\theta_1/\theta_2 \approx 1$ .

Рассмотрение рис. 2 наглядно показывает целесообразность снижения накачки до величины  $0.1-0.2$ , что в  $50-100$  раз меньше интенсивностей, применяемых на практике.

В качестве дополнительной иллюстрации приведем более подробно результаты измерения фактора качества  $0-0$  резонанса при несколько иных режимах установки. Температура рабочей кюветы была снижена до  $30^\circ\text{C}$ , что привело к снижению темновой ширины резонанса до  $\sim 21$  Гц. Накачка осуществлялась светом одной  $D_2$  линии ( $7800 \text{ \AA}$ ). Температура изотопического фильтра была повышена до  $70^\circ\text{C}$ , что подняло эффективность накачки  $Q$  до  $0.97$ . На рис. 3, а представлены записи формы резонанса при малой (1) и оптимальной (2) мощности СВЧ поля. Интенсивность накачки была установлена на уровне  $I=0.1$ . Это соответствовало фототоку  $I_\Phi=0.8$  мкА фотодиода ФД-7К, регистрировавшего прошедший через кювету свет. На рис. 3 приведены фрагменты записи шумов сигнального тракта при включенном СВЧ поле, без него и при закрытом фотодиоде.

Эти записи сделаны при калиброванном увеличении тракта в 100 раз. Обработка записей дает  $F=130 \text{ Гц}^{-1} \cdot \text{с}^{1/2}$ , что служит хорошей иллюстрацией работоспособности системы в режиме «сверхмалой» интенсивности света.

Показательно (рис. 4), что увеличение интенсивности накачки до  $I_\phi=7 \text{ мкА}$  ( $I=0.5$ ) приводит к резкому (в  $\sim 40$  раз) увеличению сигнала 0—0 резонанса, что сопровождается значительным (так как  $I < I_0$ ) увеличением предельного фактора качества. Реальный же фактор качества  $F(I)$  не только не растет, но даже несколько падает в полном соответствии с (5).

4. Как продемонстрировано выше, предельный параметр качества  $\Phi(I_0) \sim \sim 10^3 \text{ Гц}^{-1} \cdot \text{с}^{1/2}$  рубидиевого резонанса не удается реализовать при традиционной технике генерации СВЧ поля на основе умножения и синтеза частоты кварцевого генератора. Заметим, что амплитудные флуктуации, существенные при их относительной величине  $10^{-5}$  и более, могут быть достаточно просто устра-

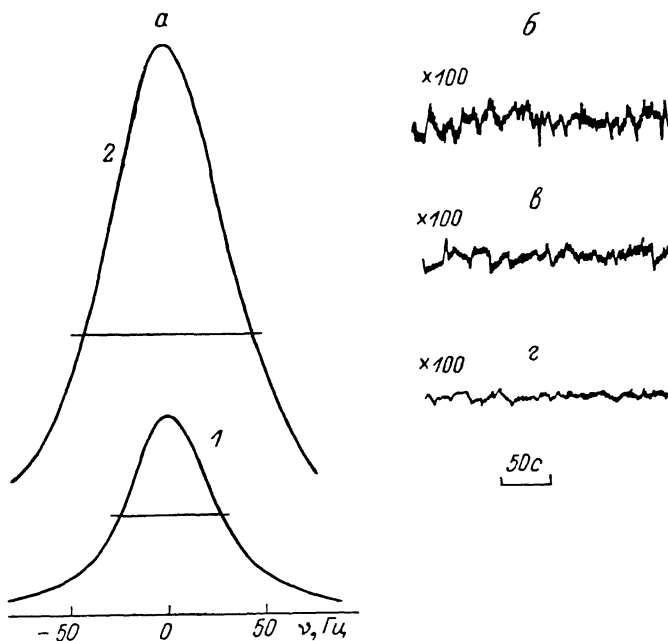


Рис. 3. Сигнал и шумы 0—0 резонанса при  $I_\phi=0.8 \text{ мкА}$ .

$\alpha$  — сигнал при слабом (1) и оптимальном (2) СВЧ поле, б — шумы при включенном СВЧ поле, в — шумы фототока, г — собственные шумы сигнального канала.  $\nu_0=20.5 \text{ Гц}$ ,  $\gamma=23 \text{ Гц}$ ,  $F=125$  и  $\Phi=158 \text{ Гц}^{-1} \cdot \text{с}^{1/2}$ .

нены приемами автоматического регулирования. Фазовые же флуктуации, определяемые в конечном счете добротностью кварцевых резонаторов, существенно снизить не удастся, так что значение  $F \simeq 100 \text{ Гц}^{-1} \cdot \text{с}^{1/2}$  близко к предельному. Полностью реализовать качество рубидиевого резонанса можно только при условии перехода на более стабильный опорный генератор, например мазер или, возможно, генератор СВЧ с сапфировым резонатором [4, 5]. Однако, рассматривая такие перспективы, нужно внимательно следить за приоритетами, диктуемыми конкретным применением стандарта. Дело в том, что реализация предельного параметра качества  $\Phi(I_0)$  требует восстановления интенсивности накачки до уровня  $I_0$  с соответствующим снижением долговременной стабильности. Если приоритет отдан последней, то может показаться полезным не повышать, а еще более снижать интенсивность света, жертвуя качеством резонанса ради его стабильности и полагаясь на высокое качество опорного генератора.

5. Во избежание недоразумений нужно указать, что рекомендуемое радикальное уменьшение света накачки не может быть осуществлено в стандартном приборе без каких-либо переделок. Снижение интенсивности, сохраняя или даже повышая параметр качества, приводит к резкому уменьшению — примерно на те же два порядка — величины сигнала двойного резонанса. (Это обстоятельство

служило психологическим барьером к эмпирическому выходу на рекомендуемый режим). Поэтому переход на новый режим должен сопровождаться постановкой дополнительного предусилителя сигнала с достаточно большим входным сопротивлением, чтобы шумы фототока приемника доминировали над шумами усилителя. Кроме того, поскольку устранение световых сдвигов существенно повышает класс прибора, необходимо, чтобы все его системы оказались на уровне новых потенциальных возможностей. Например, сохранившаяся после ослабления света нестабильность выходной частоты может оказаться тривиальным следствием нелинейности сканирования СВЧ, флуктуаций магнитного поля и т. п.

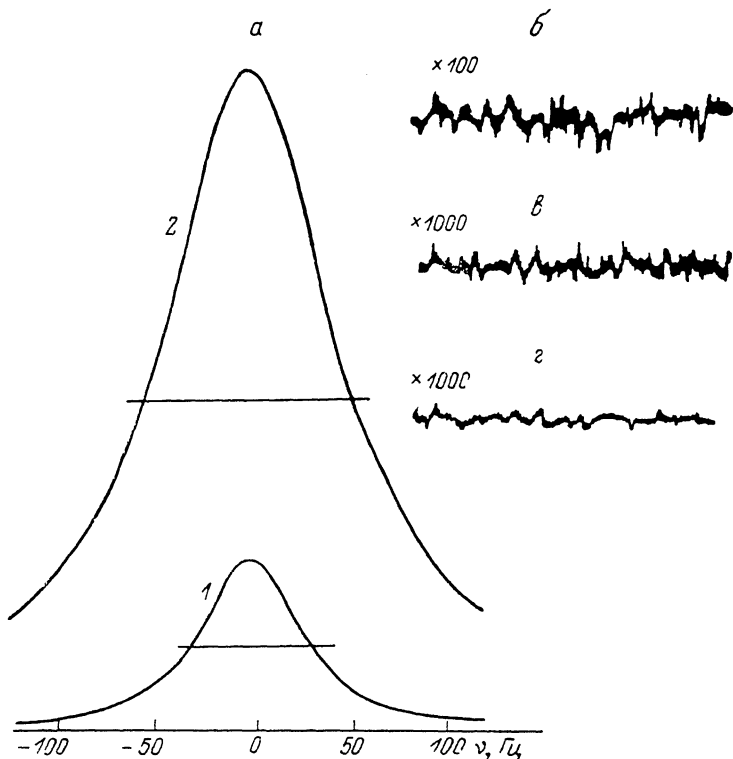


Рис. 4. Сигнал и шумы 0—0 резонанса при  $I_{\phi}=7$  мкА.  $\gamma_0=20.5$  Гц,  $\gamma=30$  Гц,  $F=116$  и  $\Phi=1560$  Гц $^{-1} \cdot \text{с}^{1/2}$ .

6. Итак, анализ разрешающей способности рубидиевого дискриминатора частоты с учетом реальных источников шумов позволяет сделать вывод о необходимости радикального (в 50—100 раз) снижения интенсивности света накачки по сравнению с используемыми на практике значениями. Это приводит к пропорциональному уменьшению медленных дрейфов частоты 0—0 резонанса, прямо или косвенно связанных со световыми сдвигами. В настоящее время борьба с этими сдвигами ведется методами компенсации сдвигов, вносимых различными элементами схемы за счет тщательного согласования и стабилизации их режимов. Сочетание этого подхода с предлагаемым нами снижением света накачки приведет одновременно с повышением долговременной стабильности к снижению требований к точности согласования и поддержания режимов элементов.

Отметим в заключение, что практически полное устранение указанным способом проблемы световых сдвигов позволит подойти к изучению следующих по рангу физических причин медленных уходов частоты рубидиевого 0—0 резонанса, связанных с изменением газового состава рабочей кюветы в процессе старения.

## Литература

- [1] Александров Е. Б., Якобсон Н. Н., Вершовский А. К. ЖТФ, 1986, т. 56, № 5, с. 970—973.
- [2] Александров Е. Б., Вершовский А. К., Якобсон Н. Н. Тез. докл. Всес. семинара «Оптическая ориентация атомов и молекул». Л., 1986, с. 18.
- [3] Батыгин В. В., Жолнеров В. С. Опт. и спектр., 1975, т. 39, № 3, с. 449—452.
- [4] Александров Е. Б., Вершовский А. К., Якобсон Н. Н. Тез. докл. Междунар. конф. «Применение средств измерения частоты и времени в народном хозяйстве стран — членов СЭВ». М., 1987, с. 76—79.
- [5] Blair D. C., Jones S. K. IEEE Trans. Mag., 1985, v. 21, N 2, p. 142—145.

Поступило в Редакцию  
25 декабря 1987 г.

---