

УДК 529.786+621.317.76.089.68

Ю. П. Мачехін¹, В. М. Романько², А. О. Шелехов², А. М. Негрійко³, Л. П. Яценко³

¹Харківський національний університет радіоелектроніки

²Національний науковий центр «Інститут метрології», Харків

³Інститут фізики Національної академії наук України, Київ

РУБІДІЄВІ СТАНДАРТИ ЧАСТОТИ: ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ І ВДОСКОНАЛЕННЯ

Розглянуто деякі питання розвитку рубідієвих стандартів частоти шляхом формування частотних реперів з використанням лазерних випромінювачів. Наведено результати досліджень частотних дискримінаторів та напівпровідникових лазерів.

До останнього часу рубідієві стандарти частоти (РСЧ) є найбільш вживаними джерелами еталонних частот, оскільки вони забезпечують досить високу точність часових та частотних вимірювань у складних інформаційних системах. У першу чергу до таких систем відносяться системи енерго- й газопостачання [2], GPS-технології [3], керування транспортними системами [4] і радіонавігація [1]. У GPS та інших космічних технологіях (наприклад, проект «Галілео») стандарти частоти одночасно використовуються на космічних об'єктах і наземних контрольно-вимірювальних базових станціях та повинні мати дуже близькі метрологічні характеристики. Крім того, їхнє надійне й ефективне застосування має бути забезпечене системою оперативного зв'язування сигналів стандартів частоти, розташованих на космічних об'єктах, із сигналами стандартів на Землі.

Специфіка сучасних РСЧ з рекордно високими метрологічними характеристиками полягає в тому, що їхнє конструктивне й технічне виконання залишається поки що на рівні приладів лабораторного застосування. Безумовно, спираючись на типові РСЧ, випущені малими серіями, як на основні базові засоби вимірювань, необхідно створювати такі стандарти частоти, гранично високий технічний і метрологічний

рівень яких зберігався би і в умовах, відмінних від лабораторних.

Аналіз структури сучасних РСЧ приводить до загального висновку, що одним із найбільш складних і ненадійних елементів РСЧ є частотний дискримінатор, у якому, з одного боку, використовується оптичне випромінювання, а з іншого — стабілізація здійснюється в радіочастотному діапазоні. Стабільність і відтворюваність частоти генерації стандарту визначається великою кількістю параметрів, серед яких домінують стабільність потужності й спектру випромінювання ламп накачування рубідієвої комірки. Без кардинального розв'язку завдання стійкого й стабільного режиму оптичного накачування подальший розвиток РСЧ навряд чи буде ефективним. У зв'язку з наведеними аргументами були проведені дослідження, метою яких було вивчення умов використання напівпровідникового лазера як джерела оптичного випромінювання, що забезпечує накачування рубідієвої комірки дискримінатора.

ЗАГАЛЬНІ УМОВИ РОБОТИ РУБІДІЄВИХ СТАНДАРТІВ ЧАСТОТИ

Принцип дії РСЧ базується на стабілізації частоти вихідного сигналу кварцевого генератора за лінією поглинання атомів рубідію при переході з одного енергетичного стану до іншого між підрівнями надтонкої структури основного стану атомів ⁸⁷Rb.

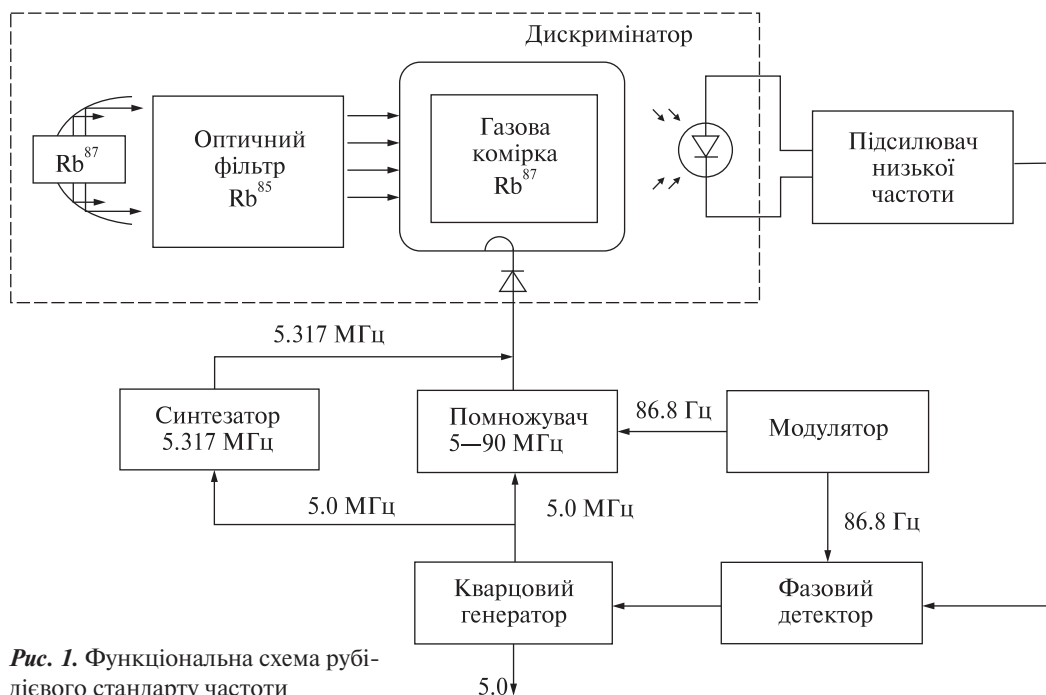


Рис. 1. Функціональна схема рубідієвого стандарту частоти

Спрощену функціональну схему рубідієвого стандарту частоти класичного типу наведено на рис. 1.

Висока стабільність частоти вихідного сигналу забезпечується стабільністю частоти еталонного атомного переходу та малою шириною його спектральної лінії поглинання.

Основним вузлом рубідієвого стандарту, у якому реалізується його принцип дії, є квантовий дискримінатор. У об'ємному резонаторі, налаштованому на частоту мікрохвильового переходу, розташована скляна комірка з парою ^{87}Rb . Як джерело накачування, як правило, застосовується газорозрядна лампа з парою того ж елемента. Світло від цієї газорозрядної лампи після оптичної фільтрації, яка здійснюється за допомогою комірки з парою, наповненою іншим ізотопом рубідію ^{85}Rb , накачує атоми у комірку поглинання і далі попадає на фотодіод. Одночасно комірка поглинання зазнає впливу НВЧ-поля резонатора, на вхід якого надходить сигнал помноженої частоти кварцевого генератора. Необхідна для збудження атома рубідію резонансна частота 6834.692540 МГц формується шляхом прямого помноження сигналу кварцевого гене-

ратора та підмішування до нього сигналу синтезатора, в результаті чого одержується НВЧ-сигнал частотою, який використовується для збудження переходів у атомах ^{87}Rb . НВЧ-сигнал модулюється за частотою. Низькочастотна фазова модуляція здійснюється у одному з каскадів помножувача. Поглинання світла атомами ^{87}Rb у комірку буде змінюватись відповідно до модуляції, а на виході фотодіода з'являється сигнал, що несе інформацію про величину і знак відхилення помноженої частоти кварцевого генератора від центра лінії еталонного атомного переходу.

Таким чином, рубідієвий стандарт частоти з оптичним накачуванням — це типова система частотного автопідстроювання (ЧАП), у дискримінаторі якого використовується 0-0-перехід між підрівнями надтонкої структури основного стану атомів ^{87}Rb .

НАКАЧКА РУБІДІЄВИХ СТАНДАРТІВ ЧАСТОТИ НАПІВПРОВІДНИКОВИМ ЛАЗЕРНИМ ДІОДОМ

Одним з найважливіших елементів дискримінатора є джерело накачки парів рубідію, яким, як

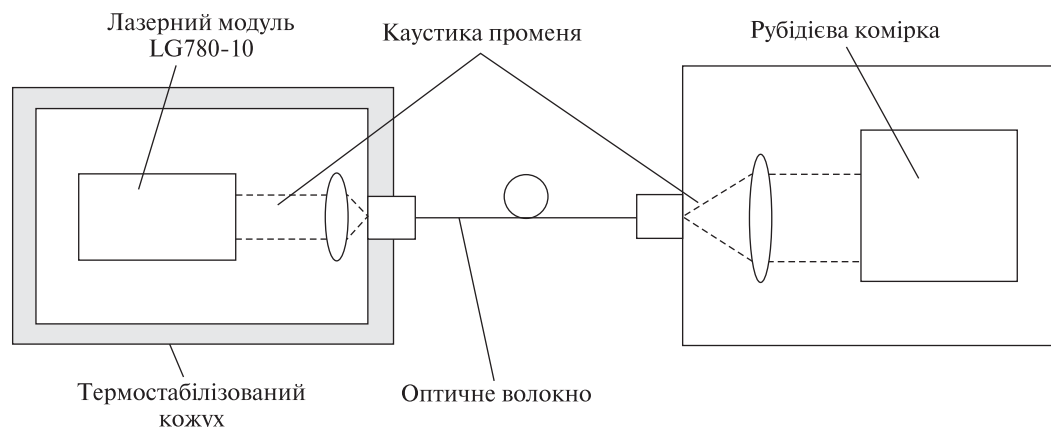


Рис. 2. Функціональна схема з'єднання лазерного модуля LG780-10 і рубідієвої комірки

правило, є газорозрядна лампа з парою ^{87}Rb . Цей елемент є одним з найскладніших для виготовлення як з технологічного, так і з конструкційного боку.

Збудження лампи накачки на парі рубідію здійснюється за допомогою спеціальної електронної схеми. Спочатку генератором пілкоподібних імпульсів збуджується інертний газ. Після цього генератор відключається, і залишається збудження розрядом НВЧ-поля від НВЧ-джерела. При певних значеннях струму підігріву та потужності НВЧ-збудження лампа починає випромінювати світло необхідної довжини хвилі для збудження 0-0-переходу у комірці поглинання.

Очевидно, що газорозрядна лампа має занадто складну оптико-механічну конструкцію, для її виготовлення необхідне складне технологічне обладнання. Вона дуже критична до струму підігріву та потужності НВЧ-збудження. Крім того, її типова вартість перевищує 1500 \$ США.

В даній роботі для спрощення конструкції дискримінатора ми пропонуємо як джерело накачки напівпровідниковий лазерний модуль LG780-10 виробництва фірми LG, стабілізований за довжиною хвилі і має достатню потужність випромінювання. Цей модуль призначено для застосування у апаратурі, де висуваються підвищені вимоги до стабільності випромінюваного сигналу, якості променя, відмовостійкості тощо.

Лазерний модуль LG780-10 має такі характеристики:

- довжина хвилі випромінювання — 780 нм;
- максимальна вихідна потужність (з коліаторною оптикою) — 5 мВт;
- робоча температура навколишнього середовища — до 45 °С.

Лазерний модуль LG780-10 оснащено високоякісною коліаторною оптикою, яка дозволяє подальше формування променя з необхідними параметрами (каустика та ін.).

У випадку застосування лазера для накачки РСЧ критичною характеристикою є довжина хвилі лазерного випромінювання. На довжину хвилі впливають різні параметри, у тому числі температура навколишнього середовища. Ця температура у блоці, де працює рубідієва комірка, становить +55...+65 °С. Це недопустимо для нормальної роботи лазерного модуля LG780-10, тому пропонується розташувати модуль у окремому термостабілізованому кожусі. За таких умов випромінювання буде надходити до блоку рубідієвої комірки по оптичному волокну. Далі промінь буде розширюватись за допомогою колімуючої оптики до потрібних параметрів і подаватись на рубідієву комірку. Функціональну схему такого з'єднання наведено на рис. 2.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РУБІДІЄВОГО ДИСКРИМІНАТОРА З ЛАЗЕРНИМ НАКАЧУВАННЯМ

У ході роботи було відпрацьовано конструкцію макетного зразка квантового дискримінатора

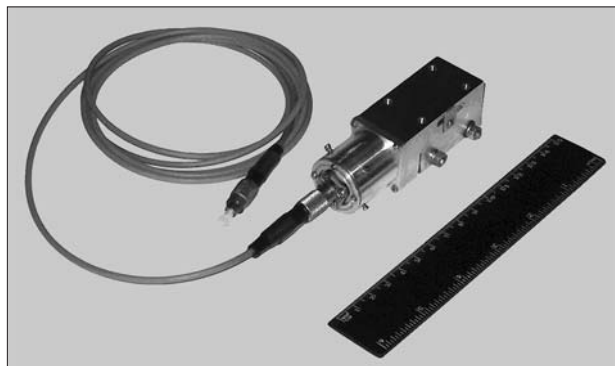


Рис. 3. Лазерний модуль з волоконним виводом випромінювання

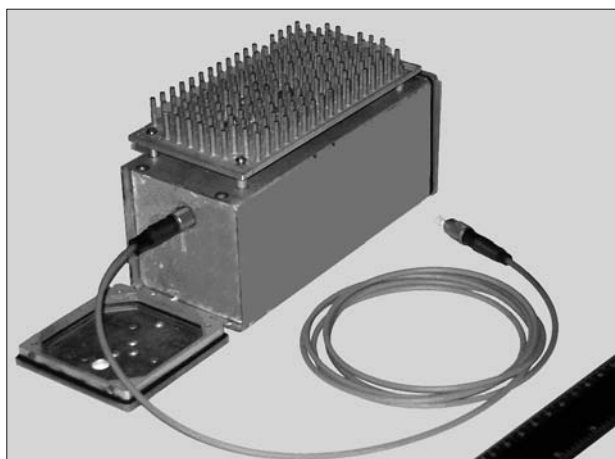


Рис. 4. Квантовий дискримінатор з волоконним введенням випромінювання

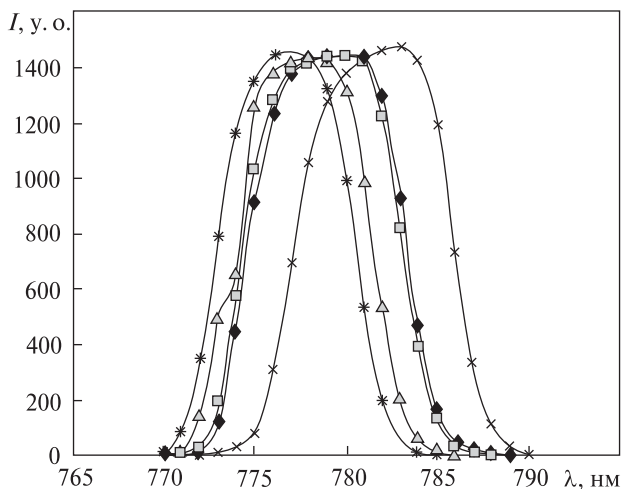


Рис. 5. Спектр лазера при різних температурах (♦ і □ — 23 °С, △ — 18.5 °С, × — 15.5 °С, * — 38 °С)

(рис. 3, 4). За його основу взято конструкцію квантового дискримінатора стандарту СЧВР-1, але замість спектрального джерела застосовується вузол джерела накачування (ВДН). Він дозволяє передати до комірки поглинання для її збудження світловий сигнал, що подається по спеціальному світловоду від вузла формування світлового сигналу (ВФСС) лазерного діода LG780-10. Решта вузлів дискримінатора залишилися без змін.

Резонансними довжинами хвиль для рубідію є довжини хвиль 780 нм і 785 нм, причому довжина хвилі визначається з точністю до сотих одиниць нанометра. Потужність випромінювання накачування має менш критичне значення. Отже, першочерговим завданням є здатність точного підстроювання довжини хвилі випромінювання напівпровідникового лазера накачування з подальшим утриманням заданої величини.

Відомо, що довжина хвилі випромінювання напівпровідникового лазера залежить від струму, який протікає через кристал напівпровідника, а також від температури напівпровідникового лазерного діода. Оскільки величина струму, який протікає через напівпровідниковий лазер, більшою мірою впливає на потужність випромінювання, а також обмежена граничним значенням, при якому відбувається необоротне руйнування напівпровідникового лазерного діода, струм прийнято встановлювати відповідно до номінального значення для кожного конкретного екземпляра напівпровідникового лазерного діода. При номінальному значенні струму напівпровідникового лазера довжина хвилі випромінювання також близька до номінальної. Таким чином, для підстроювання довжини хвилі випромінювання напівпровідникового лазера необхідно мати технічну можливість змінювати у певних межах температуру напівпровідникового лазерного діода і утримувати потрібне її значення з точністю, яку вимагає експериментальне дослідження.

Було проведено експериментальне дослідження залежності впливу температури лазерного модуля LG780-10 на його довжину хвилі випромінювання. Перед кожним вимірюванням лазер витримувався в робочому режимі не мен-

ше двох годин, щоб міг встановитися термодинамічний баланс між лазерним модулем і охолоджувачем на базі елемента Пельтьє. Результат представлено на рис. 5.

Як видно з одержаних залежностей, для вирішення поставленої задачі необхідні контролери струму і температури для напівпровідникового лазерного діода з можливістю точного підстроювання струму живлення і температури напівпровідникового лазера. Оптимальним підходом для забезпечення необхідних режимів роботи діода є застосування струмових і температурних контролерів, сконструйованих за алгоритмом повного пропорційно-інтегрально-диференційного контролю (ПІД-контролер).

Підтвердження можливості застосування напівпровідникового лазера як джерела накачування парів рубідію у стандартах частоти і часу, визначення позитивних та негативних сторін такого методу було здійснено шляхом проведення експериментальної перевірки роботи напівпровідникового лазера у складі реального приладу.

Для проведення експериментальних досліджень було зібрано макетний зразок квантового дискримінатора, зовнішній вигляд якого наведено на рис. 4. Спочатку в дискримінаторі розміщувався «класичний» генератор накачування газорозрядного типу. Дискримінатор через перехідний кабель підключався до стандарту частоти СЧВ-74. Після виходу СЧВ-74 на режим і отримання на виході перепідсилювача дискримінатора другої гармоніки частотою 173.6 Гц величиною 20–40 мВ генератор накачування було замінено на лазерний модуль LG780-10. Також було отримано сигнал другої гармоніки частотою 173.6 Гц величиною 20–30 мВ зі зміною струму накачки в межах 40–50 мА. Таким чином, експериментально підтверджена принципова можливість збудження комірки поглинання випромінюванням лазерного модуля.

ВИСНОВКИ

Дослідження створеного дослідного зразка підтвердили правильність закладених принципів та технічних рішень, а одержані результати можуть служити основою подальшого удосконалення приладів, зокрема, їхнього переведення на сучасну елементну базу з метою виробництва для широкого кола споживачів.

Автори Ю. П. Мачехін, А. М. Негрійко і Л. П. Яценко вдячні фонду INTAS за часткову підтримку роботи, що виконувалася у рамках проекту Об-1000024-9075.

1. *Аргунов А. Д.* Формирование и применение интегрального радионавигационного поля // «Навигация 98»: Сб. тр. Второй междунар. конф. — 1997. — Т. 2. — С. 336–353.
2. *Клейман А. С.* Стандарт частоты и времени рубидиевый: создание, исследование и применение // Укр. метрологічний журн. — 1998. — Вип. 1–4.
3. *Клейман А. С., Левенберг А. И., Соловьев А. В. и др.* Применение рубидиевого стандарта частоты и времени в системе координатно-временного обеспечения при использовании GPS-технологий // Космічна наука і технологія. — 2001. — 7, № 4. — С. 101–106.
4. *Сетевые спутниковые радионавигационные системы /* Под ред. В. С. Шебшаевича. — М.: Радио и связь, 1993. — 408 с.

Надійшла до редакції 20.02.09

*Yu. P. Machekhin, V. M. Roman'ko,
A. O. Shelekhov, A. M. Negriyko, L. P. Yatsenko*

RUBIDIUM FREQUENCY STANDARDS: PROSPECTS OF DEVELOPMENT AND ADVANCE

Some aspects of the development of rubidium frequency standards with the application of laser sources for frequency discriminators formation are considered. Our results of the investigations of frequency discriminators and semiconductor lasers are given.