

Поверхневу щільність понад 224 кбіт/мм² може бути забезпечено з використанням сучасних зондових головок із трапецієдними полюсними накопичувачами.

Для посилення магнітнотвірних властивостей робочих шарів носіїв для перпендикулярного запису виду Fe-Co-B рекомендується використати додаткові підшари состава Ni-Fe. Ці підшари ефективно зменшують коерцитивну силу й збільшують площинну магнітну анізотропію.

Література

1. **Demonstration** and characterization of 130 Gb/in² recording systems/[K. Stoev a. o.] // 4-th Annu. Conf. Magnetism and Magnetic Materials (MMM). — Tampa FL. — Nov. 2002, paper AG-08.

2. **Sun, N. X.** Soft high saturation magnetization (Fe_{0,7}Co_{0,3})_{1-x} Nx thin film for inductive write heads. / N. X. Sun, S. X. Wang // IEEE Trans. Magn.— Sept. 2000 — Vol. 36.— P. 2506–2509.

3. **Карпенков, С. Х.** Тонкопленочные магнитные преобразователи / С. Х. Карпенков.— М.: Радио и связь, 1985.— 208 с.

4. **High** linear density study of advanced single pole head / [K. Stoev a. o.] // Intermag Conf.—Amsterdam, The Netherlands.— Apr./May 2002, paper FB-05.

5. **Recording** layer influence on the dynamics of a soft underlayer / [D. Litvinov, A. Lyberatos, J. Wolfson a. o.] // IEEE Trans. Magn.— Sept. 2002.— Vol. 38.— P. 1994–1996.

6. **Effect** of anisotropy field of soft magnetic underlayer on read / write properties in perpendicular recording media / Y. Nakatani, N. Hayashi, Y. Uesaka, H. Fukushima // Abstr. 47th Conf. Magnetism «Magnetic Materials», paper ES-08.

Г. Н. Розоринов, Масуд Махджубиан

МАГНИТНЫЕ ГОЛОВКИ ДЛЯ СВЕРХВЫСОКОПЛОТНОЙ ЗАПИСИ

Исследуются высокомоментные материалы, являющиеся одним из возможных технологических решений для обеспечения высокой плотности записи в цифровых накопителях. Поверхностная плотность более 200 кбит/мм² была достигнута при продольной записи с использованием конструкции записывающей головки с плоским верхним полюсом. С целью усиления магнитномягких свойств рабочих слоев носителей для перпендикулярной записи вида Fe-Co-B рекомендовано использовать дополнительные подслои состава Ni-Fe. Эти подслои эффективно уменьшают коэрцитивную силу и увеличивают поверхностную магнитную анизотропию.

Ключевые слова: высокомоментный материал; коэрцитивная сила; магнитная анизотропия; перпендикулярная запись; поверхностная плотность записи.

G. M. Rozorinov, Masoud Mahjoubian

A MAGNETIC HEADS FOR SUPER HIGH DENSITY RECORDING

A high-torque materials which are one of possible technological decisions for providing of high-density recording in digital storage devices are researched. Surface density over 200 Kbit/mm² was attained at a longitudinal record, with the use of construction of writing down head with a flat overhead pole. For strengthening of soft magnetic properties of workings layers of magnetic medium for the perpendicular record of Fe-Co-B type it is recommended to utilize the additional Ni-Fe sublayers. These sublayers effectively diminish a coercitivity and increase a surface magnetic anisotropy.

Keywords: high-torque material; coercitivity; magnetic anisotropy; perpendicular record; surface bit density.

УДК 681.35

В. В. КУЗАВКОВ, канд. техн. наук, Є. В. РЕДЗЮК, Л. Т. КОВАЛЬ,
Державний університет телекомунікацій, Київ

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАДАЧІ ПРО ПОШИРЕННЯ ТЕПЛОТИ В РАДІОЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТАХ

Побудовано математичну модель, що описує процес поширення теплоти в тонкому шарі матеріалу, що покриває кристал напівпровідника. Розглянуто випадок одновимірної нестационарної теплопровідності. Розв'язувати таку задачу доводиться, зокрема, у разі використання методу власного випромінювання для локалізації несправних елементів цифрових блоків за допомогою автономних автоматизованих систем діагностування.

Ключові слова: діагностична інформація; метод власного випромінювання; радіоелектронний компонент.

Вступ

Теплова енергія, що вивільнилася в деякому пристрої внаслідок дії того чи іншого механізму тепловиділення, надалі переноситься в бік зниження температури. Усе це відбувається згідно із законами теплопередавання, що описуються відомими диференціальними рівняннями.

Розрізняють три способи перенесення теплоти:

- **теплопровідність** — перенесення теплової енергії при безпосередньому контакті тіл або частин одного тіла, що мають різну температуру;
- **конвекція** — перенесення теплоти за рахунок перемішування в просторі рухомих рідин чи газів;

• *теплове випромінювання* — перенесення теплоти у вигляді електромагнітних хвиль, супроводжуване перетворенням теплової енергії — спочатку на променисту, а далі навпаки: із променистої на теплову.

Усі три способи перенесення теплоти (теплообміну) можна спостерігати при реєстрації діагностичного параметра (ДП), здійснюваній за розробленим нами *методом власного випромінювання* для локалізації несправного радіоелектронного компонента (РЕК) цифрового блока.

Застосовуючи метод власного випромінювання для виробів радіоелектроніки, слід брати до уваги той факт, що ресурс РЕК прямо пов'язаний із температурою цих компонентів [1]. Ефективність методу власного випромінювання особливо переконлива, коли йдеться про дослідження великої кількості *однотипних* цифрових блоків і РЕК.

Аналіз джерел [1–3] підтверджує, що теплові поля однотипних виробів добре корельовані. Діагностичний параметр при діагностуванні формується відповідно до способу (теплопровідність, конвекція, теплове випромінювання) перенесення теплової енергії і може бути поданий не лише набором числових значень, а й у вигляді двовимірних (тривимірних) термограм. Сформувавши набір інформативних ознак, можемо застосувати алгоритми розпізнавання образів.

Варто наголосити, що метод власного випромінювання уможливорює високопродуктивну безконтактну діагностику із застосуванням комп'ютерної техніки для обробки результатів [4].

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження показали: *метод власного випромінювання дає змогу не лише визначити технічний стан цифрового блока, а й локалізувати несправні РЕК*, що входять до його складу.

Постановка задачі

Процес локалізації несправності передбачає визначення несправного РЕК за допомогою реєстрації та обробки ДП, роль якого відіграє тепловий відгук на входні тестові послідовності для цього компонента. Щоб скористатись при цьому методом власного випромінювання, необхідно побудувати математичну модель задачі про поширення теплоти в такому багатошаровому об'єкті, як РЕК.

Основна частина

Побудуємо модель передавання теплоти від розігрітого кристала напівпровідника РЕК до поверхні захисного шару, що покриває кристал, ізолюючи його від зовнішнього середовища. Здобута таким чином інформація про температурний режим кристала являє собою той ДП, що фігурує в методі власного випромінювання.

Розглянемо *температурне поле* — сукупність значень температури всіх точок досліджуваної

системи в даний момент часу, припустивши, що температура T може змінюватися за координатами x, y, z і за часом t .

Температурне поле, змінюване в часі, називають *нестационарним*.

У тривимірному просторі температурне поле може змінюватися за координатами (однією, двома чи всіма трьома). Відповідно його називають *одно-, дво- чи тривимірним* полем.

Що ж до температурного поля РЕК, то воно в загальному випадку є тривимірне нестационарне температурне поле, що подається виразом

$$T = f(x, y, z, t). \quad (1)$$

Важливо взяти до уваги, що промені, які відходять від площини, мають різну інтенсивність випромінювання відносно нормалі до площини.

Залежність інтенсивності випромінювання від його напрямку встановлюється *законом Ламберта*: кількість променистої енергії, випромінюваної елементом поверхні в напрямі іншого елемента, пропорційна до добутку кількості енергії, випромінюваної по нормалі, на абсолютну величину просторового кута, утворюваного напрямом випромінювання з нормаллю до цієї поверхні (рис. 1) [5].

Інтенсивність кожного випромінювання можна знайти за допомогою тригонометричного співвідношення:

$$Q_x = Q \sin Y,$$

де Q — енергія, Вт, випромінювана з усієї площі.

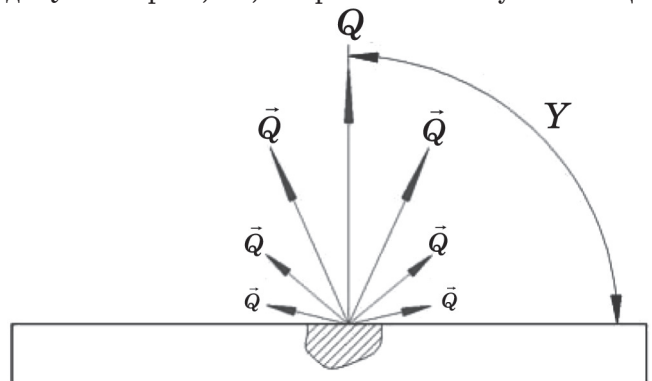


Рис. 1. Схема до визначення інтенсивності випромінювання

Отже, $\sin Y$ — це свого роду кутовий коефіцієнт, що строго підпорядковується тригонометричним закономірностям, тобто *найбільша кількість променистої енергії випромінюється в напрямі, перпендикулярному до поверхні випромінювання*.

Закон Ламберта повною мірою справджується для абсолютно чорного тіла та тіл, що характеризуються дифузійним випромінюванням при температурі $0 \dots 60$ °С.

Зокрема, якщо метод власного випромінювання застосувати в разі реєстрації діагностичного параметра стосовно одного напрямку — нормалі до поверхні РЕК, то дістанемо *рівняння одновимір-*

ного стаціонарного температурного поля, що набирає спрощеного порівняно з (1) вигляду

$$T = f(x). \quad (1')$$

У разі будь-якого температурного поля в тілі існують точки з однаковою температурою. Вони утворюють *ізотермічну поверхню*, або *ізотерму*. Кожна ізотерма відповідає певній температурі. Ізотерми не перетинаються. Тому зміна температури може спостерігатися лише в напрямках, що не збігаються з ізотермами, наприклад у напрямі \vec{x} на рис. 2. Найшвидше змінюється температура в напрямі \vec{n} , перпендикулярному поверхні РЕК. При цьому маємо:

$$\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta n} = \frac{dT}{dn} = \text{grad}T. \quad (2)$$

Границю, до якої прямує відношення приросту ΔT температури до відстані Δn між ізотермами, коли остання прямує до нуля, називають *градієнтом температури*.

Отже, градієнт — це вектор, напрямлений по нормалі до ізотермічної поверхні в бік підвищення температури. Кількість q , Вт/м², теплоти, що переноситься через поверхню S за одиницю часу, називається *питомим тепловим потоком*, або *густиною теплового потоку*.

Питомий тепловий потік — це вектор, напрям якого збігається з напрямом поширення теплоти в даній точці і протилежний щодо градієнта температури.

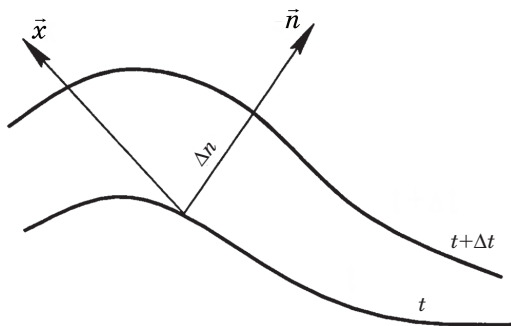


Рис. 2. Ізотермічні поверхні

Основний закон теплопровідності — *закон Фур'є* — установлює кількість q теплоти, переданої поверхнею РЕК і пропорційної до градієнта температури, площі перерізу (перпендикулярного до поверхні РЕК) поширення теплоти, а також часу:

$$q = -\lambda \text{grad}T, \quad (3)$$

де λ , Вт/мК, — коефіцієнт теплопровідності, який характеризує фізичну властивість шару, що покриває кристал напівпровідника (кількість теплоти, що передається за одиницю часу через одиницю поверхні в разі, коли температурний градієнт дорівнює одиниці):

$$\lambda = \left| -\frac{q}{\text{grad}T} \right| = \frac{Qh}{St\Delta T} = \frac{Ph}{S\Delta T}, \quad (4)$$

де Q — теплова енергія, що переноситься, Дж; $P = Q/t$ — тепловий потік, Вт/м², через поверхню S ; ΔT — зміна температури в тілі на відстані h , що дорівнює висоті h .

Розв'язання задачі теплопровідності полягає в складанні та розв'язанні рівняння (3) для конкретних умов.

Розглянемо, наприклад, побудову математичної моделі задачі про поширення теплоти в однорідному елементарному об'ємі.

Нехай захисний шар кристала напівпровідника має однорідну структуру. Розмістимо вісь $Q(x)$ так, щоб точка O належала поверхні кристала, а точка x була зовні РЕК, тобто розташовувалася з боку реєстрації діагностичного параметра за умови $x = h$, де h — висота захисного шару, що покриває кристал напівпровідника (рис. 3).

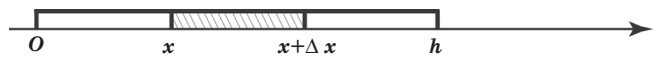


Рис. 3. Однорідний елементарний об'єм

Установлено [5], що швидкість q поширення теплоти (кількість теплоти, яка проходить через переріз з абсцисою x за одиницю часу) обчислюється за формулою:

$$q = -\lambda S \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (5)$$

де S — площа зазначеного перерізу; λ — коефіцієнт теплопровідності шару, що покриває кристал напівпровідника.

Дослідимо елемент між перерізами з абсцисами x і $x + \Delta x$.

Об'єм ΔQ теплоти, переданої за час Δt , набирає вигляду

$$\begin{aligned} \Delta Q &= Q(x + \Delta x) - Q(x) = \\ &= \lambda S \left(\frac{\partial u((x + \Delta x), t)}{\partial x} - \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \right) \Delta t. \end{aligned} \quad (6)$$

За формулою Лагранжа маємо:

$$\begin{aligned} \Delta Q &= \lambda S \frac{\partial^2 u(x + \theta_1 \Delta x, t)}{\partial x^2} \Delta t \Delta x, \\ 0 &< \theta_1 < h. \end{aligned} \quad (7)$$

Припустимо, що вибраний елемент невеликий за розміром і температура всіх його точок у будь-який момент часу однакова. Тоді

$$\Delta Q = C\rho S(u(x, t + \Delta t) - u(x, t))\Delta x, \quad (8)$$

де C , ρ — відповідно теплоємність і густина матеріалу шару, що покриває кристал.

За формулою Лагранжа дістаємо:

$$\begin{aligned} \Delta Q &= C\rho S \frac{\partial u(x, t + \theta_2 \Delta t)}{\partial x} \Delta t \Delta x, \\ 0 &< \theta_2 < h. \end{aligned} \quad (9)$$

Із (7) і (9) випливає рівність

$$C\rho S \frac{\partial u(x, t + \theta_2 \Delta t)}{\partial x} \Delta t \Delta x = \lambda S \frac{\partial^2 u(x + \theta_1 \Delta x, t)}{\partial x^2} \Delta t \Delta x, \quad (10)$$

після ділення обох частин якої на $S\Delta t\Delta x$ та переходу до границі при $\Delta x \rightarrow 0$, $\Delta t \rightarrow 0$ знаходимо рівняння Фур'є параболічного типу

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (11)$$

де $a^2 = \frac{\lambda}{C\rho}$.

Отже, (11) — це рівняння теплопровідності, що описує поширення теплоти в шарі, який покриває кристал напівпровідника.

Як бачимо, побудова математичної моделі задачі про поширення теплоти полягає в пошуку функції $u(x,t)$, що задовольняє:

- 1) початкові умови $u(x,0) = \varphi(x)$, $0 \leq x \leq h$;
- 2) граничні умови $u(0,t) = \psi_1(t)$, $u(h,t) = \psi_2(t)$,
 $0 \leq t \leq t + \Delta t$;
- 3) рівняння теплопровідності (11).

Коли ж ідеться про метод власного випромінювання стосовно задачі про поширення теплоти в РЕК, то в цьому разі маємо таку конкретизацію.

Початкові умови: досліджується залежність температури в напрямі, перпендикулярному до поверхні РЕК на рівні висоти (товщини) шару, що покриває кристал, коли всередині захисного шару кристала РЕК перепадів температури немає.

Граничні умови: температура кристала напівпровідника (температура внутрішньої поверхні шару, що покриває кристал), K , визначається відповідно до діагностичної моделі $p-n$ ($n-p$) переходу для методу власного випромінювання:

$$T = \frac{U - \Phi_{30}}{\frac{k}{q} \ln \left(\frac{-\frac{2qD_n}{L_n} S'_n \operatorname{csch} \frac{W}{L_n} n_1 + \frac{2qD_n}{L_n} S'_n \operatorname{cth} \frac{W}{L_n} n_2}{I_{00}} \right)} \cdot \varepsilon_3.$$

Тут значення струму через $p-n$ перехід [7] враховує фізико-хімічні властивості напівпровідника й визначається так:

$$I = -\frac{2qD_n}{L_n} S'_n \operatorname{csch} \frac{W}{L_n} n_1 + \frac{2qD_n}{L_n} S'_n \operatorname{cth} \frac{W}{L_n} n_2,$$

де Φ_{30} — ширина забороненої зони при нульовій температурі; ε_3 — температурна чутливість; U — напруга на $p-n$ переході; k — стала Больцмана; q — заряд електрона.

Температуру зовнішньої поверхні шару, що покриває кристал напівпровідника, потрібно визначати через деякий час — час виходу РЕК на стаціонарний режим.

Час, необхідний для нагрівання поверхні РЕК від температури T_1 до T_2 , визначається так [5]:

$$t_{1-2} = t_2 - t_1 = mCR_T \ln \frac{PR_T - (T_1 - T_0)}{PR_T - (T_2 - T_0)},$$

де m — маса РЕК; T_0 — температура, що дорівнює температурі навколишнього середовища в момент часу $t = 0$; P — потужність, яка виділяється рівномірно за об'ємом; C — питома теплоємність тіла; R_T — тепловий опір поверхні, що покриває кристал.

Рівняння теплопровідності (11) через коефіцієнт a враховує фізичні характеристики матеріалу, який виконує захисні функції щодо кристала напівпровідника, тобто шару, що покриває кристал.

Висновок

Побудовано модель передавання теплоти від розігрітого кристала напівпровідника РЕК на поверхню захисного шару, що покриває кристал, ізолюючи його від зовнішнього середовища. Здобута в такий спосіб інформація про температурний режим кристала виступає як діагностичний параметр методу власного випромінювання.

Напрямок подальших досліджень — розв'язання задачі нестационарної теплопровідності з визначенням параметрів температурного поля для різних методів реєстрації діагностичного параметра та різних видів тестових впливів, урахування у методі власного випромінювання.

Література

1. **Вавилов, В. П.** Тепловые методы контроля композиционных структур и изделий радиоэлектроники / В. П. Вавилов. — М.: Радио и связь, 1984. — 162 с.
2. **Концевой, Ю. А.** Методы контроля технологии производства полупроводниковых приборов / Ю. А. Концевой, В. Д. Курдин. — М.: 1973. — 140 с.
3. **Данилин, Н. С.** Теория и методы неразрушающего инфракрасного контроля радиоэлектронных схем / Н. С. Данилин, О. Д. Бакланов, Ю. И. Загорюцкий. — М.: Изд-во МО СССР, 1974. — 164 с.
4. **Кузавков, В. В.** Застосування методу власного випромінювання для технічної діагностики радіоелектронних блоків / В. В. Кузавков, О. Г. Янковський: зб. наук. праць ОДАТРЯ. — Одеса, 2014. — Вип. 9. — С. 30–37.
5. **Тихонов, А. Н.** Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. — М.: Наука, 1977.
6. **Практическая реализация теплового неразрушающего контроля зданий и строительных сооружений** / [О. Н. Будадин, О. В. Лебедев, Е. В. Абрамова и др.]: сб. докл. 4-го Всерос. с международным участием науч.-практ. семинара. — СПб., 2004. — С. 106–107.
7. **Кузавков, В. В.** Діагностична модель $p-n$ ($n-p$) переходу в динамічному режимі для безконтактного індукційного методу діагностування / В. В. Кузавков: зб. наук. праць ВІКНУ. — 2014. — Вип. 45. — С. 41–47.

В. В. Кузавков, Е. В. Редзюк, Л. Т. Коваль

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ О РАСПРОСТРАНЕНИИ ТЕПЛОТЫ В РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТАХ

Построена математическая модель, описывающая процесс распространения теплоты в тонком слое материала, покрывающего кристалл полупроводника. Рассмотрен случай одномерной нестационарной теплопроводности. Решение подобной задачи необходимо при использовании метода собственного излучения для локализации неисправных элементов цифровых блоков автономными автоматизированными системами диагностирования.

Ключевые слова: диагностическая информация; метод собственного излучения; радиоэлектронный компонент.

V. V. Kuzavkov, E. V. Redzyuk, L. T. Koval

A MATHEMATICAL MODEL OF THE PROBLEM OF THE DISTRIBUTION OF HEAT IN THE REC (RADIO ELECTRONIC COMPONENTS)

In this paper we solve the problem of constructing a mathematical model of heat distribution in the layer covering the semiconductor crystal case for one-dimensional unsteady heat conduction. Solving such problems is necessary when using natural radiation to locate faulty elements of digital blocks standalone automated systems diagnostics (AA MD).

Keywords: diagnostic information; the method of natural radiation; radio electronic components.

УДК 621.384

А. Л. ГОЛИК, аспирант, Государственный университет телекоммуникаций, Киев

ОРГАНИЗАЦИЯ МОДУЛИРУЮЩЕГО СИГНАЛА И СПОСОБА МОДУЛЯЦИИ ИМ ЛУЧА ЛАЗЕРА

Предложен способ модуляции внешним оптическим модулятором луча лазера, основанный на следующих соображениях. У модулятора типа «Corning-10-A» допустимая скорость модулирующего сигнала равна 10,5 Гбит/с, тогда как совокупная скорость передачи всех сигналов услуг 4G в ИГТС (до 2000 услуг, по 12 Мбит/с для каждой) составляет всего 24 Гбит/с. Данное противоречие разрешается применением принципов организации технологии TDMA для сигналов, предоставляемых по технологии OFDM.

Ключевые слова: модулирующий сигнал; интерактивная гетеродинная транспортная сеть; модуляция луча лазера внешним оптическим модулятором; групповой канал; квадратурный преобразователь; OFDM-символ.

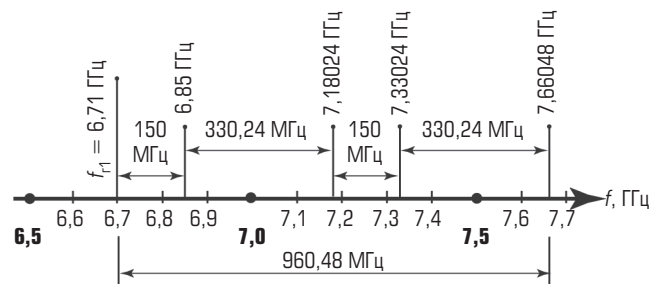
Введение

При разработке распределительной сети необходимо обеспечить передачу по ней большого количества (1–2 тыс.) услуг 4G, передача каждой из которых требует пропускной способности сети от 3 до 12 Мбит/с. Суммарная полоса рабочих частот такой сети при модуляции КАМ-64 либо КАМ-128 достигает нескольких гигагерц [1]. Очевидно, что такую полосу рабочих частот можно реализовать на несущей частоте в миллиметровом диапазоне. С этой целью применяется двулучевая волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС), по которой распространяются два синхронизированных по частоте луча, разность частот которых принадлежит миллиметровому диапазону. Один луч модулирован сигналами услуг, второй представляет собой опорный гетеродинный сигнал для получения в фотоприемнике базовой станции радиосигнала с несущей частотой в миллиметровом диапазоне [2].

Организация модулирующего сигнала и способа модуляции им луча лазера

Для эффективного использования спектра частот до 1 ГГц, где возможна цифровая обработка сигналов, групповой канал с двумя OFDM-символами можно организовать по схеме, изображенной на рисунке [3].

Используя разные частоты f_c сигналов гетеродинов квадратурных преобразователей, формируем несколько групповых каналов, как показано на рисунке. Для примера в таблице представлен один ствол из семи групповых каналов (каждый канал содержит два символа из шести модуляторов КАМ-128), построенный на базе четырнадцати OFDM-символов.



Расположение на частотной оси рабочих полос двух OFDM-символов первого группового канала после квадратурного преобразователя

Совокупная полоса частот ствола вместе с защитными полосами частот составляет 6,72336 ГГц, а рабочая полоса частот всех 5376 поднесущих в четырнадцати OFDM-символах равна 4,62336 ГГц.

Объединитель групповых сигналов (ОГС) функционирует по технологии OFDM, если быстродействие оптического модулятора позволяет воспринять суммарный сигнал. В противном случае ОГС должен работать по технологии TDMA, подавая сигнал каждого квадратурного преобразователя последовательно (по одному импульсу в один слот) на оптический модулятор.

При этом сигнал одного слота будет иметь полосу рабочих частот порядка 1 ГГц, тогда как внешний оптический модулятор допускает модулирующий сигнал с полосой 1,78 ГГц. Если длительность OFDM-символа (вместе со служебной информацией и паузой между слотами) составляет $16,24 \cdot 10^{-6}$ с, то имеются все основания полагать, что через $300 \cdot 10^{-6}$ с можно будет продолжить модуляцию луча лазера сигналами второго слота.