

Харківська державна академія міського господарства

На правах рукопису

КІСЛОВ Вячеслав Володимирович

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ  
ОПТИЧНИХ ІМПУЛЬСІВ У ВОЛОКОННИХ СВІТЛОВОДАХ

05.09.07 – Світлотехніка та джерела світла

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 1996



НВ 34.243

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00759711 (U)

Дисертація в рукопис

Роботу виконано в Державному науково-виробничому об'єднанні  
"Метрологія"

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор В.К.Копил

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор Л.А.Назаренко  
кандидат фізико-математичних наук, доцент В.Ф.Рой

Провідна організація - Харківське конструкторське бюро по машино-  
будуванню ім.О.О.Морозова

Захист відбудеться "5" квітня 1996 р. о 14<sup>30</sup>  
на засіданні Спеціалізованої вченої ради КО2.13.04 при  
Харківській державній академії міського господарства  
(310002, м. Харків, вул.Револуції, 12)

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці ХДАМГ  
(310002, м. Харків, вул.Револуції, 12)

Автореферат розісланий "4" березня 1996 р.

Вчений секретар  
Спеціалізованої вченої ради

Є. Д. Д'яков

ЛННБ ім. В. Стефаніка  
ДП "Укробл"

## Загальна характеристика роботи

### Актуальність теми

Питання, пов'язані з розповсюдженням оптичного випромінювання крізь волоконний світловод, є актуальними в зв'язку з тими застосуваннями, які вони знайшли в світлотехніці, вимірjuвальній техніці та оборонній техніці. За останні роки ця галузь бурхливо розвивається і в цілому є досить вивченою з погляду фізичних явищ. Разом з тим підвищення точності лазерних інформаційно-вимірjuвальних систем (ЛІВС), в яких волоконний світловод є складовою частиною, є неминучою частиною прогресу у даній галузі та потребує нових підходів, зокрема у створенні методів та засобів метрологічного забезпечення вимірjuвань, пов'язаних з ЛІВС.

Волоконний світловод є унікальним пристроєм, яке допомагає в одному разі одержувати (чи передавати) інформацію про величини чи процеси від недосяжних об'єктів, а в іншому разі – бути калібратором вимірjuвальної системи. Відзначемо при цьому, що самокалібрувальні вимірjuвальні системи – це сучасні вимоги у розвитку вимірjuвальної техніки.

Ясно, що при всіх таких випадках важлива не тільки правильна інтерпретація явищ розповсюдження випромінювання у волоконному світловоді, але і оцінювання точності одержаної вимірjuвальної інформації.

У дисертаційній роботі розглянуто розповсюдження імпульсного лазерного випромінювання крізь волоконний світловод (ВС) на довжинах хвиль 0,53 та 1,06 мкм. Дослідженню розповсюдження моноімпульса крізь ВС присвячена значна кількість робіт, але у них в основному вивчались явища розповсюдження випромінювання для довжин хвиль 0,85; 1,3; 1,5 мкм. Це зумовлено широким застосуванням ВС у засобах зв'язку з напівпровідниковими лазерами. У

той же час питання розповсюдження моноімпульсу з довжинами хвиль 0,53 та 1,06 мкм недостатньо вивчені. Стримуючим фактором у проведенні досліджень в цій галузі була відсутність методів та засобів метрологічної атестації у цій галузі.

Актуальність таких досліджень та їх зв'язок з впровадженнями видна на такому вагомому прикладі. Одним із засобів вже згадуваної самокалібровки ЛІВС є засіб затримання зондування сигналу на зазделегідь визначений час за допомогою ВС. ЛІВС дозволяє вимірювати час розповсюдження імпульсу з точністю десятою частки наносекунди. Тому, враховуючи методи вимірювання часу затримки ЛІВС, сучасні вимоги до похибки формування затримки оптичного зондованого імпульсу знаходяться в межах  $\pm 50 \cdot 10^{-12}$  с, що накладає жорсткі вимоги на точність відтворення форми обвідної інтенсивності імпульсу зважаючи на вимоги відповідності між обвідними інтенсивності зондованого та затриманого імпульсів. Таким чином, необхідна інформація про розповсюдження лазерного імпульсного випромінювання у неоднорідному діелектричному циліндричному волноводі з частотною дисперсією, яким власно і є з електродинамічного погляду волоконний світловод.

Зрозуміло, для експериментального дослідження явищ розповсюдження імпульсного лазерного випромінювання крізь ВС потрібне відповідне джерело, що відповідає вимогам як з точки зору стабільності, та і по спектральному діапазону.

### **Мета роботи**

Дослідження розповсюдження оптичних імпульсів крізь ВС з довжинами хвиль 0,53 та 1,06 мкм: створення методичної основи та метрологічно атестованої приборної бази для проведення вказаних досліджень та підтвердження їх певності та необхідної точності.

### **Наукова новизна роботи**

Розроблена методика та створена апаратура, яка дозволяє проводити вимірювання часу розповсюдження моноімпульсів на довжинах хвиль 0,53 та 1,06 мкм з похибкою  $+ 30 \cdot 10^{-12}$  с та збереженням форми обвідної інтенсивності.

Розроблено оригінальний пристрій стабілізації параметрів лазерів з активною синхронізацією мод, який захищено авторським свідоцтвом. На підставі цього пристрою одержана фазова нестабільність  $+ 20 \cdot 10^{-12}$  с, амплітудна нестабільність  $10^{-3}$ .

Розроблені засіб та апаратура для вимірювання параметрів волоконних світловодів з застосуванням лазерів з активною синхронізацією мод на довжинах хвиль 0,53 та 1,06 мкм.

### **Основні положення роботи, що виносяться на захист**

Метод та засоби вимірювання параметрів розповсюдження оптичних імпульсів у ВС з використанням лазерів з активною синхронізацією мод.

Методика дослідження основних параметрів лазерів з активною синхронізацією мод: амплітудну та фазову нестабільність, та метрологічно атестований стенд для їх вимірювань.

Результати досліджень характеристик волоконних світловодів та лазерів з активною синхронізацією мод, на підставі яких показана можливість створення міри оптичної довжини та генератора стандартних оптичних сигналів.

### **Практична цінність роботи**

Розроблений та виготовлений новий клас приладів - волоконно-оптичні лінії затримки (ВОЛЗ) для довжин хвиль 0,53 та 1,06 мкм з похибкою затримки та відтворенням моноімпульсу  $+30 \cdot 10^{-12}$  с.

Розроблені, досліджені та метрологічно атестовані засоби вимірювання параметрів розповсюдження оптичних сигналів крізь ВС

на базі лазерів з активною синхронізацією мод.

Одержані джерела випромінювання послідовності імпульсів відомої форми обвідної інтенсивності на довжинах хвиль 0,53 та 1,06 мкм, причому прив'язка до електричного синхросигналу здійснена з похибкою  $+20 \cdot 10^{-12}$  с, а нестабільність інтенсивності випромінювання складає  $10^{-3}$ , що дозволило застосувати їх для атестації фотоприймальних пристроїв і передачі одиниці потужності при розробці та виготовленню еталона сили світла – кандели.

#### **Апробація результатів роботи**

Основні результати досліджень доповідались та обговорювались на Українській конференції "Метрологія та вимірвальна техніка", 3-ій Всесоюзній школі з пікосекундної техніки, 4-ій Міжнародній конференції "Волоконно-оптичні лінії зв'язку і системи передачі інформації", 3-ій Всесоюзній конференції "Метрологія у далекومتрії", 4-ій Всесоюзній конференції Держстандарту, НТС ДНВО "Метрологія".

#### **Публікації**

Основні результати дисертації надруковані у 15 роботах.

#### **Обсяг роботи**

Дисертація складається із вступу, 4 глав та висновків. Вона містить 110 сторінок, з яких 91 сторінка друкованого тексту, 19 малюнків. Список літератури становить 90 найменувань.

#### **Зміст роботи**

У вступі розглянуто сучасний стан потреб науки та техніки в дослідженнях розповсюдження оптичних сигналів у ВС на довжинах хвиль 0,53 та 1,06 мкм з метою удосконалення самокалібруючих лазерних інформаційно-вимірвальних систем. У ньому обґрунтовується актуальність проблеми, формулюються основні наукові поло-

ження, що виносяться на захист, а також задачі, які розв'язуються у роботі, обґрунтовується їх наукова новизна та практична цінність, наводяться дані реалізації результатів досліджень, а також дається стисла характеристика змісту роботи.

### Глава 1. Розповсюдження лазерного випромінювання у волоконних світловодах (огляд)

Метою даної глави є визначення параметрів, які характеризують розповсюдження моноімпульса у ВС, а також розробка методів та вибір засобів вимірювання цих параметрів.

Поставлена мета досягається аналізом літературних даних, за допомогою яких показано, що розширення імпульсного сигналу визначається в основному міжмодовою дисперсією, тобто відмінністю групових швидкостей направляємих мод.

Розглянуті просторові, часові, енергетичні та спектральні характеристики лазерного моноімпульсу. На основі огляду літературних даних показано, що обвідну інтенсивності випромінювання моноімпульсу можна записати таким виразом

$$J_0(t) = \sum_{m,n} J_{mn}(t) \quad (1)$$

де  $m, n$  - індекси поперечних мод,  $t$  - час.

$$J_{mn}(t) \sim \left\{ \sum_q E_{mnq}(t) \exp[i(\omega_{mnq}^0 + q\Delta\omega_{mnq})t + \varphi_{mnq}] \right\}^2 \quad (2)$$

де  $q$  - індекс поздовжньої моди,  $\omega_{mnq}^0$  - центральна частота генерації,  $\Delta\omega_{mnq}$  - частотний інтервал між поздовжувальними модами,  $\varphi_{mnq}$  - фаза окремої поздовжувальної моди,  $E(t)$  - амплітуда поля поздовжувальної моди.

Після розповсюдження у ВС довжиною  $L$  з дисперсією

$$n = A + \frac{B \bar{\omega}^2}{c^2} \quad (3)$$

де  $A$  та  $B$  – постійні коефіцієнти,  $c$  – швидкість світла у вакуумі,  $\bar{\omega}$  – частота випромінювання, яка характеризує окрему моду ВС.

$$J_{mnq}(t) \sim \left\{ \sum_q E_{mnq}(t) \exp i [(\bar{\omega}_{mnq}^0 + q \Delta \bar{\omega}_{mnq}) t + \frac{L}{c} \left[ A + \frac{B(\bar{\omega}_{mnq}^0 + q \Delta \bar{\omega}_{mnq})}{c^2} \bar{\omega}_{mnq}^0 \right] \right\}^2 \quad (4)$$

На основі порівняння (2) та (4) зроблено висновок, що форма обвідної інтенсивності моноімпульсу після розповсюдження у ВС буде відтворена, коли  $L$ ,  $\Delta \bar{\omega}_{mnq}$ ,  $q \cdot \bar{\omega}_{mnq}$  не змінюються при розповсюдженні у ВС.  $E_{mnq}(t)$  буде зменшено у те ж саме число разів по індексах  $m$ ,  $n$ ,  $q$ . Тому можна сформулювати потрібні умови відтворення форми обвідної інтенсивності розповсюдження у ВС оптичного моноімпульсу – це вимога зберігання фазових та амплітудних співвідношень для обвідної інтенсивності різних напрямків поперечних мод, які складають моноімпульс.

Для аналізу розповсюдження моноімпульсу у ВС потрібне джерело випромінювання, яке б імітувало розповсюдження окремої поперечної моди моноімпульса у ВС, причому параметри цього джерела повинні піддаватися вимірюванням з потрібною точністю як до, так і після розповсюдження його випромінювання у ВС.

Тому для дослідження розповсюдження моноімпульса у ВС було обрано джерело випромінювання на основі лазерів з активною син-

хронізацією мод, випромінювання якого уявляє собою послідовність оптичних імпульсів, при цьому обвідна інтенсивності випромінювання має вигляд

$$J(t) \sim \left\{ \sum_q E_q \exp i [(\omega_0 + q \Delta \omega) t + \varphi_q] \right\}^2 \quad (5)$$

де  $q$  – число мод у спектрі генерації,  $E_q$  – поле окремої поздовжувальної моди.

Як виходить з (5), випромінювання такого лазера одномодове та відрізняється від виразу (2) відсутністю залежності  $E$  від  $t$ . Останнє зауваження дуже суттєве, тому що дозволяє застосовувати для часових вимірювань високоточний фазовий засіб.

На основі вищезгаданого метода дослідження ВС виглядає таким чином.

1. Оптимальні умови вводу оптичного випромінювання визначаються скануванням випромінювання джерела по тілесному куту вводу випромінювання, по мінімуму фазових та амплітудних викривлень визначається область можливої роботи у даному тілесному куті. Під фазовими та амплітудними викривленнями треба розуміти хиткість фази та амплітуди інтенсивності вихідного випромінювання при скануванні на вході ВС випромінюванням лазера з активною синхронізацією мод.

2. Оптимальні умови виводу випромінювання визначаються скануванням точковим фотоприймачем по апертурі вихідного випромінювання для оптимальних умов вводу. Критерієм вибору оптимальних умов є мінімум фазових та амплітудних викривлень.

3. Амплітудні викривлення контролюються за допомогою вимірювача амплітуди та точкового фотоприймача.

4. Фазові співвідношення контролюються за допомогою фазометру, причому одне плече фазометра підключається до входу ВС, а друге – на вихід.

## **Глава 2. Дослідження метрологічних характеристик джерела випромінювання**

Метою цієї глави є визначення метрологічних характеристик лазерів з активною синхронізацією мод, таких як стабільність фазових співвідношень, тобто постійність фази послідовності оптичних імпульсів по відношенню до електричного синхросигналу; та стабільність амплітудних співвідношень, тобто постійність амплітуди інтенсивності окремої моди і внаслідок цього стабільність амплітуди інтенсивності оптичних імпульсів.

Поставлена мета досягається дослідженням стабільності фазових та амплітудних співвідношень від впливу таких факторів, як потужність накачки активного елемента, потужність керуючого сигналу на модуляторі та розстрію резонатора. З метою попередньої стабілізації фазових та амплітудних співвідношень проведено стабілізацію вищезгаданих параметрів випромінювання за допомогою пристрою стабілізації.

Вимірювання нестабільності амплітудних співвідношень проводились за допомогою скануючого інтерферометра, сигнал якого дозволяв виміряти амплітуду інтенсивності окремої моди з похибкою 0,01%, а внаслідок (5), при умові  $\varphi = \text{const}$ , що забезпечувала активна синхронізація, можна було обчислити обвідну інтенсивності окремого імпульса з послідовності імпульсів.

Вимірювання нестабільності фазових співвідношень проводились за допомогою фазометра, причому на одне з плічей фазометра подавався стабільний електричний синхросигнал, а на друге – детек-

ктований широкосмуговим фотоприймачем оптичний сигнал. Мінімум нестабільності свідчив, що  $\varphi \rightarrow \text{const}$ . Це стабілізувало параметри імпульсної послідовності внаслідок оптимального обміну енергією синхронізуючими модами. Розділення фазометра було на рівні  $8 \cdot 10^{-14}$  с.

Внаслідок проведених досліджень та застосування засобів стабілізації були мінімізовані фазова та амплітудна нестабільність випромінювання лазерів з активною синхронізацією мод, що дозволяло створити метрологічно атестований стенд для дослідження ВС з застосуванням джерела випромінювання з такими параметрами

	He-Ne	АІГ: Nd <sup>3+</sup>
	(0,63 мкм)	(0,53 та 1,06 мкм)
вихідна потужність	15 мВт	500 мВт
фазова нестабільність	$7 \cdot 10^{-12}$ с	$15 \cdot 10^{-12}$ с
амплітудна нестабільність	$4 \cdot 10^{-4}$	$10 \cdot 10^{-4}$
частота слідування імпульсів	$250 \cdot 10^6$ Гц	$250 \cdot 10^6$ Гц
тривалість імпульсів	$380 \cdot 10^{-12}$ с	$180 \cdot 10^{-12}$ с
глибина фазової модуляції	$10^0$	$10^0$
діаметр вихідної плями	1,5 мм	1,3 мм.

Таким чином, в цій главі запропоновано метод досліджень основних параметрів лазерів з активною синхронізацією мод: амплітудної нестабільності та фазової нестабільності.

Розроблено, впроваджено та атестовано стенд для вимірювання вищезгаданих параметрів, який дозволив з необхідною точністю та достовірністю провести дослідження лазерів з активною синхронізацією мод як інструменту для досліджень ВС.

Одержані результати знаходяться на рівні сучасних вимог до

таких джерел і на рівні найкращих результатів, одержаних іншими авторами.

### Глава 3. Дослідження ВС за допомогою лазерів з активною синхронізацією мод

Метою даної глави є дослідження ВС на довжинах хвиль 0,53 та 1,06 мкм за допомогою стенду і лазерів з активною синхронізацією мод та визначення таких параметрів, як оптимальні апертури вводу та виводу випромінювання, час розповсюдження у ВС при збереженні форми обвідної інтенсивності моноімпульсу, стабільність затримки часу розповсюдження; дослідження вищезгаданих параметрів в умовах впливу кліматичних та механічних факторів, а також відтворення у часі.

Поставлену мету досягнуто дослідженням окремих відрізків довжиною 100, 500 та 1500 м грдієнтного одномодового та багатомодового ВС.

Вибір оптимальних апертур вводу та виводу випромінювання визначено експериментально з умов зберігання фазових та амплітудних співвідношень послідовності імпульсів, що проходять крізь ВС. Дослідженню підлягали такі прилади вводу-виводу випромінювання разом з ВС як телескопи, лінзи, градани. Роботи проводились на стенді, який містив стабілізований лазер з активною синхронізацією мод на  $\text{Al}^{3+}\text{G}:\text{Nd}$ , випромінювання якого контролювалось за допомогою широкосмугового фотоприймача та стробоосцилографу, фазометра, генератора синхрочастот, вимірвача амплітуди імпульсів.

Дослідження проводились в такій послідовності. Випромінювання лазера подавалось на вхід ВС, причому проводилось сканювання по куту вводу. Після проходження ВС випромінювання подавалось на

вхід точкового вимірювального фотоприймача, електричний сигнал якого подавався на фазометр та вимірювач амплітуди імпульсів. Точковий фотоприймач сканівався у площині  $Z$ , перпендикулярній напрямку випромінювання з ВС. Синхронізація лазера та фазометра здійснювалась генератором синхрочастот.

Були досліджені залежності амплітуди та фази сигналу від довільної координати  $X$  в площині  $Z$ . На підставі аналізу залежностей зроблено висновок про наявність визначеної вихідної кутової апертури, при виводі з якої випромінювання амплітудні та фазові співвідношення зберігаються, що говорить про можливість вводу та виводу випромінювання моноімпульсу зі збереженням форми обвідної інтенсивності.

Для визначення кутів вводу випромінювання була знята залежність розмірів області оптимального виводу від кутів вводу випромінювання.

Аналіз вищезгаданих залежностей показав, що використання одномодового градієнтного ВС довжиною більш 500 м краще в зв'язку з тим, що у нього існує достатньо значна зона кутів вводу та виводу випромінювання, у якій зберігаються фазові та амплітудні співвідношення в синхронізованій послідовності оптичних імпульсів, які пройшли крізь ВС. Це говорить про те, що ослаблення за рахунок кутів вводу та виводу випромінювання у ВС такого типу буде мінімальним. Тому можна припустити, що викривлення форми обвідної інтенсивності оптичного моноімпульсу будуть визначатися максимумом викривлень в даних апертурах вводу та виводу випромінювання.

У даній главі проведені вимірювання часу розповсюдження моноімпульсу у ВС. Вимірювання були проведені фазовим засобом: для

цього була розроблена спеціальна методика, яка дозволяла робити вимірювання вищезгаданим засібом. Для цього було проведено порівняння вимірювань затримки розповсюдження моноімпульсу у середовищі з сильновираженою дисперсією фазовим засібом та засібом прямого детектування та вимірювання інтервалу часу, тому що міжмодова відстань  $\Delta f$  моноімпульсу і лазера з активною синхронізацією мод може бути різною.

У результаті порівняння було показано, що час розповсюдження випромінювання буде мати такий вигляд

$$T = n_0 \frac{L}{c} + \frac{2LBf_0^2}{c^3} \quad (6)$$

де  $f_0$  - центральна частота генерації,  $n$  - показник заломлювання на частоті  $f_0$ .

Враховуючи ідентичність вимірювання часового інтервалу засібом прямого вимірювання та фазовим засібом у вакуумі, було зроблено висновок про ідентичність вимірювань обома засібами, тому що з (6) дисперсійний зсув не залежить від  $\Delta f$  та визначається властивостями ВС, постійними у часі.

Експериментально час розповсюдження моноімпульсу було визначено на стенді, який містив лазер з активною синхронізацією мод, модулятор фази, який керує внутрішньорезонаторною синхронізацією сигналу, генератор опорних частот, два фазових детектори, фазометр, вимірник часових інтервалів.

Для вимірювання часу розповсюдження спочатку вимірювався приблизно час розповсюдження фазовим засібом з похибкою  $\pm 0,4 \cdot 10^{-9}$  с, а потім уточнювався час розповсюдження з похибкою  $\pm 25 \cdot 10^{-12}$  с.

Для досліджень відтворення апертур вводу та виводу вип-

роміювання, а також часу розповсюдження оптичного моноімпульсу крізь ВС з зберіганням форми обвідної інтенсивності були проведені експерименти по дослідженню довгочасової стабільності. Була досліджена залежність відтворення часу затримки розповсюдження у часі для ВС довжиною 1200 м одномодового та 1200 м багатомодового градієнтного, а також 100 м ВС одномодового.

При дослідженні ВС 1200 м багатомодового та 100 м одномодового було показано, що фазові та амплітудні співвідношення у часі (експеримент був на протязі 10 хвилин) не зберігаються, у той же час для ВС 1200 м одномодового відхил часу затримки не перевищує  $20 \cdot 10^{-12}$ с, що порівняно з нестабільністю імпульсної послідовності лазерів з активною синхронізацією мод.

Вплив температури ВС на час розповсюдження оптичного моноімпульсу досліджувався на стендах, згаданих раніше. Температура ВС змінювалась через вміщення його у камеру, яка має можливість дотримувати температуру мінус  $50 \pm 40^\circ\text{C}$ . Похибка вимірювання температури становила  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ .

В результаті проведених досліджень показано, що тільки одномодовий світловод може зберігати не змінними параметри вводу-виводу випромінювання, але час розповсюдження звеличується пропорційно температурі.

Таким чином, у даній главі проведено експериментальне дослідження ВС за допомогою вже розроблених та атестованих джерел випромінювання, а також за допомогою розроблених методик та атестованих стендів, що дозволило одержати ряд нових результатів, які характеризують розповсюдження лазерного випромінювання на довжинах хвиль 0,53 та 1,06 мкм у ВС. Основною особливістю результатів цієї глави є те, що вони одержані за допомогою метро-

логічно атестованої апаратури. Практично ці результати за своїми точностними характеристиками відповідають результатам досліджень розповсюдження випромінювання у ВС для інших довжин хвиль, а деякі, зокрема точність вимірювання часу розповсюдження, відтворення обвідної інтенсивності моноімпульсу, їх перевершують.

#### **Глава 4. Застосування лазерів з активною синхронізацією мод та волоконних світловодів на довжинах хвиль 0,53 та 1,06 мкм в метрології**

Метою даної глави є опис деяких застосувань досліджень, проведених у главах 1-3, а саме опис застосувань лазерів з активною синхронізацією мод та ВС на довжинах хвиль 0,53 та 1,06 мкм в метрології.

Проведені дослідження дають можливість вирішити задачу розробки та виготовлення ВОЛЗ відповідно до сучасних вимог, які пред'являються ЛІВС. Для задоволення цих вимог були проведені експерименти по розробці, виготовленню та дослідженню ВОЛЗ. Основними критеріями вибору конструкції ВОЛЗ було збереження стійкості до кліматичних та механічних впливів. В результаті застосування відповідних технологічних операцій була сконструйована котушка діаметром 60 мм, конструкція якої дозволяла в основному нейтралізувати вплив кліматичних та механічних факторів.

Після виготовлення котушки встановлювались на стенді, описаному у главі 3, для вимірювання вхідних та вихідних апертур, піддавались впливу кліматичних та механічних факторів для визначення діапазону температур, вібрацій, прискорень та т.п. з метою визначення їх експлуатаційних параметрів.

Результати досліджень показали, що даної конструкції ВОЛЗ, як власне, було показано у главі 3 для ВС, температура є визна-

чальним фактором для відтворення параметрів. Причому величина часу розповсюдження була нестабільною, тобто спостерігався гістерезис, у той час як вхідні та вихідні апертури зберігали своє числове значення. Для усунення гістерезису у конструкції котушки був встановлений фазовий вимірвач затримки та був організований від'ємний оберниний зв'язок за рахунок керування температурою ВОЛЗ на підставі показів фазового вимірвача затримки.

В результаті проведених досліджувальних та технологічних робіт була створена ВОЛЗ довжиною 1 км, яка затримувала моноімпульс на довжині хвилі 1,06 мкм з похибкою  $20 \cdot 10^{-12}$  с та гістерезисом  $10 \cdot 10^{-12}$  с, що є на сьогодні кращий результат для такого типу приладів.

У той же час ВОЛЗ забезпечує відтворювання форми обвідної інтенсивності оптичного моноімпульсу з доказаною та вищезгаданою похибкою. Тому з врахуванням, що оптична довжина є добуток часу розповсюдження на швидкість світла у вакуумі, з врахуванням відтворювання затримки розповсюдження при зберіганні обвідної інтенсивності моноімпульсу, ми можемо сказати, що дана ВОЛЗ є міра оптичної довжини для імпульсів, тривалість яких більше 1 нс, які випромінюються на довжині 1,06 мкм. Конкретне значення довжини  $L_{opt}$  міри оптичної довжини дорівнює  $L_{opt} = 1520,05 \pm 1 \cdot 10^{-2}$  м.

Дослідження, здійснені у главі 2, дозволили визначити метрологічні характеристики лазерів з активною синхронізацією мод на He-Ne (0,63 мкм) та AlG:Nd<sup>3+</sup> (0,53 та 1,06 мкм). Тому з'явилась можливість порівняти можливості застосування цих лазерів як джерел зондуючого сигналу з сучасними можливостями використання джерел зондованого сигналу у фазових віддалемірах. В результаті розрахунків, з врахуванням параметрів, наданих у главі 2, показа-

но, що застосування лазерів з активною синхронізацією мод у фазових віддалемірах може дати збільшення далькості їх дії при зберіганні точностних параметрів у чотири рази.

Наслідком досліджень, здійснених у главі 2, є те, що отриман по суті генератор стандартних світлових імпульсів, форма обвідної інтенсивності яких розраховується на підставі вимірювань не прямим методом, тобто скануючого інтерферометра, а не широко-смуговий фотоприймача, перехідну та фазову характеристику якого треба вимірювати у смузі частот порядку 10 ГГц, що проблематично. Гарантією можливого застосування перетворення Фур'є є стабільність фазових співвідношень імпульсної послідовності по відношенню до синхросигналу. Тому у результаті вжитих заходів по стабілізації фазових та амплітудних співвідношень, у результаті мінімазації таких факторів, як розстройка резонатора, коефіцієнт внутрішньорезонаторної модуляції, потужність накачування з'явилась можливість одержати "джітер" імпульсів по відношенню до синхросигналу на рівні  $10 \cdot 10^{-12}$  с (pic to pic), причому в це значення входять нестабільність вимірювача фази та шуми фотоприймальних систем.

Враховуючи ті обставини, що форма обвідної інтенсивності імпульсів лазера з активною синхронізацією мод відома, а тривалентність їх достатньо мала ( $\approx 180 \cdot 10^{-12}$  с), з'явилась можливість атестації фотоприймальних систем, що і було зроблено при розробці Державного спеціального еталона одиниці потужності слабких світлових потоків. А внаслідок стабілізації амплітудних співвідношень з похибкою 0,1%, лазер з активною синхронізацією мод на  $\text{AlG:Nd}^{3+}$  на довжині хвилі 0,53 мкм був використаний для передавання одиниці потужності при розробці Державного первинного

еталона сили світла.

Застосування лазерів з активною синхронізацією мод та ВС в метрології не обмежується прикладами, розглянутими у даній роботі. Але в результаті проведених досліджень ми отримали з одного боку джерело випромінювання, параметри якого можуть бути виміряні непрямыми методами, які мають ряд переваг при вимірюванні форми обвідної інтенсивності імпульсів, що дало можливість метрологічно атестувати вищезгаданий параметр. З другого боку, ми отримали можливість метрологічно атестувати затримку імпульса випромінювання при збереженні форми обвідної інтенсивності, що в перспективі дає можливість застосування у дослідженнях випадкових імпульсних сигналів в оптичному діапазоні.

### **Висновки**

Основні результати роботи такі:

1. Розроблені метод та засоби вимірювання параметрів розповсюдження оптичних імпульсів у ВС з застосуванням лазерів з активною синхронізацією мод. В результаті цього досягнута можливість вимірювання часу затримки розповсюдження оптичних імпульсів з похибкою  $\pm 20 \cdot 10^{-12}$  с, а також проведення атестації ВОЛЗ по такому параметру як відтворення форми обвідної інтенсивності тривалістю менш ніж  $10^{-9}$  с. Тим самим зроблено крок у досягненні точності вимірювання в області довжин хвиль 0,53 та 1,06 мкм.

2. Розроблена методика досліджень основних параметрів лазерів з активною синхронізацією мод: амплітудної та фазової нестабільності. Створено метрологічно атестований стенд для вимірювання цих параметрів. На цій основі проведені вимірювання фазової нестабільності послідовності імпульсів лазерів з актив-

ною синхронізацією мод по відношенню до синхроімпульсу з похибкою  $\pm 1 \cdot 10^{-12}$  с та амплітудної нестабільності мод випромінювання і, таким чином, амплітуда інтенсивності імпульсів випромінювання з похибкою 0,1%.

3. Проведені дослідження параметрів лазерів з активною синхронізацією мод створили методичну основу при використуванні цих лазерів як засобів вимірювання розповсюдження оптичних імпульсів у ВС.

Запропонований пристрій стабілізації фазових та амплітудних параметрів послідовності імпульсів оптичного випромінювання.

Показано, що одержані результати знаходяться на рівні сучасних вимог до таких джерел.

Проведено експериментальне дослідження факторів, які впливають на стабільність метрологічних характеристик лазерів з активною синхронізацією мод. Це дозволило провести оптимізацію параметрів вихідного випромінювання лазерів.

4. Дослідження закономірності розповсюдження оптичного імпульсу у волоконному світловоді дозволило провести доказ відтворення форми обвідної інтенсивності оптичного імпульса.

Виміряно час розповсюдження оптичного імпульсу у ВС з похибкою  $\pm 30 \cdot 10^{-12}$  с.

5. Розроблена та досліджена волоконно-оптична лінія затримки. Досліджені такі її параметри як час затримки розповсюдження оптичного імпульса, відтворення параметрів у часі та при впливі кліматичних факторів.

На підставі проведених досліджень оптимізовані параметри ВОЛЗ з врахуванням сучасних вимог до пристрів такого типу.

Показано, що така ВОЛЗ може бути ефективно використана при

створенні міри оптичної довжини.

6. В результаті всебічних досліджень лазерів з активною синхронізацією мод показано, що стабілізовані джерела такого типу перспективні для використання у метрології як задаючі генератори зондуючих сигналів у фазових віддалемірів та як генератори стандартних оптичних імпульсів для реалізації шкали часу в оптичному діапазоні.

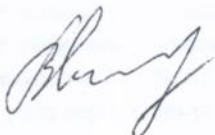
Особливе місце в впровадженні займають такі джерела при створенні еталонних засобів вимірювань. В дисертації реалізовано таке використання у Державному первинному еталоні сили світла – канделі, а також для атестації фотоприймальних пристроїв Державного спеціального еталона одиниці середньої потужності оптичних імпульсів.

**Основний зміст роботи відображено в таких публікаціях:**

1. Кислов В.В., Шаронов Г.В. Флуктуации фазы излучения непрерывных лазеров с активной синхронизацией мод. Автометрия, 1990, N 3, с. 99-101.
2. Кислов В.В., Шаронов Г.В. Амплитудная нестабильность мод излучения непрерывных лазеров с активной синхронизацией мод. Вестник Белгосуниверситета, сер.1, Физика, математика, механика, 1990, N 1, с.29-31.
3. Кислов В.В. Экспериментальное определение времени фазовой подстройки лазера с активной синхронизацией мод. Исследования в области метрологического обеспечения дальнометрии. Сб. трудов ХГНИИМ. Ленинград, 1981, с.77-82.
4. Кислов В.В., Михаль О.Ф., Олейник И.С. Устройство стабилизации мощности. Авторское свидетельство N 842749, 1981. Бюл. "Открытия изобретения, пром. образцы, тов. знаки", 1981, N 24.

5. Варчук Н. К., Вулик А. Н., Кислов В. В., Литовченко В. М. Способ оперативного контроля импульсных светодальномеров. Авторское свидетельство N 1641103, 1990.
6. Варчук Н. К., Вулик А. Н., Кислов В. В., Литовченко В. М. Способ оперативного контроля импульсных светодальномеров. Патент Украины N 999 от 14.05.1993.
7. Волобуев Н. И., Кислов В. В., Кошута С. М., Михаль О. Ф. О задаче стабилизации мощности лазера непрерывного излучения. Тезисы 4-ой Всесоюз. конф. Госстандарта. Харьков, 1980, с. 90.
8. Кислов В. В. О применении лазера с активной синхронизацией мод для определения переходной характеристики фотоприемника. Тезисы 4-ой Всесоюз. конф. Госстандарта. Харьков, 1980, с. 89.
9. Алексеев А. Д., Быков И. М., Кислов В. В. Экспериментальное определение нестабильности фазы последовательности импульсов излучения лазеров с активной синхронизацией мод. 3-я Всесоюзная школа по пикосекундной технике. Тез. докл., Ереван, 1988, с. 45-47.
10. Кислов В. В., Рожанчук Л. Н. Экспериментальное исследование стабильности времени распространения последовательности пикосекундных импульсов через ВС. 3-я Всесоюзная конференция "Метрология в дальнометрии". Тез. докл., Харьков, 1988, с. 64.
11. Кислов В. В. Измерение времени распространения пикосекундных одиночных импульсов через ВС. 3-я Всесоюз. конф. "Метрология в дальнометрии". Тез. докл., Харьков, 1988, с. 65-67.
12. Варчук Н. К., Вулик А. Н., Кислов В. В. Многоэлементная ВОЛЗ для оценки качества импульсных лазерных дальномеров. 4-я Международная конференция "Волоконно-оптические линии связи и системы передачи информации". Тезисы докладов, Запорожье, 1993, с. 38-39.

13. Кислов В. В. Исследование энергетических и временных параметров лазеров с активной синхронизацией мод. Украинская научно-техническая конференция "Метрология и измерительная техника". Тезисы докладов, Харьков, 1995, с. 122.
14. Варчук Н. К., Вулик А. Н., Кислов В. В., Копыл В. К. Разработка эталона единицы мощности импульсного оптического излучения. Украинская научно-техническая конференция "Метрология и измерительная техника". Тезисы докладов, Харьков, 1995, с. 123.
15. Кислов В. В. Разработка и изготовление оптоволоконной меры оптической длины. Украинская научно-техническая конференция "Метрология и измерительная техника". Тезисы докладов, Харьков, 1995, с. 63.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Blunz' or similar, written in a cursive style.



**Kislov V.V.** Research on parameters of optic pulses propagation in fiber lightguides.

Thesis submitted for a degree of Candidate of Science (Techn.) speciality 05.09.07 – the lighting engineering and sources of light, the Kharkov State Municipal Academy, Kharkov, 1996.

The results of research to be presented for the defence include research of: characteristics of fiber lightguides and continuous wave mode-locked lasers; method and means for measuring parameters of optic pulses propagation in fiber lightguides using mode-locked lasers; technique of research of mode-locked laser main parameters: amplitude and phase instability, – and metrologically attested equipment for measuring these parameters. The thesis results have been presented in 15 scientific publications.

**Кислов В.В.** Исследование параметров распространения оптических импульсов в волоконных световодах.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.07 – светотехника и источники света, Харьковская государственная академия городского хозяйства, Харьков, 1996.

На защиту выносятся результаты исследования: характеристик волоконных световодов и лазеров с активной синхронизацией мод; метод и средства измерения параметров распространения оптических импульсов в волоконных световодах с использованием лазеров с активной синхронизацией мод; методика исследования основных параметров лазеров с активной синхронизацией мод: амплитудной и фазовой нестабильности, и метрологически аттестованный стенд для их измерений. Результаты диссертации изложены в 15 научных трудах.

**Ключові слова:** лазер з активною синхронізацією мод, волоконний світловід, амплітудна нестабільність, фазова нестабільність, волоконно-оптична лінія затримки.



Кіслов Вячеслав Володимирович

Дослідження параметрів розповсюдження  
оптичних імпульсів у волоконних світловодах

Автореферат

Відповідальний випусковий Копил В.К.

Підписано до друку 26.02.1996 р. Формат 60x84 1/16  
Друк офсетний. Обсяг 1,0 обл.-вид. арк. Тираж 100 прим. Зам. N  
Безкоштовно

---

*Віддруковано фірмою „Інформатек сервіс“*

AB 34.245