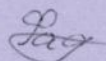


НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ФІЗИКИ

ФАДЕЄВА Тетяна Андріївна



УДК 535:666.189.21:666.22

ЕВОЛЮЦІЯ ДИСЛОКАЦІЙ І ДИСКЛІНАЦІЙ
ПОЛЯ МАЛОМОДОВОГО ВОЛОКНА

01. 04. 05 - оптика, лазерна фізика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ — 1997

Дисертацією є рукопис
Робота виконана в Сімферопольському державному
університеті ім. М.В. Фрунзе

Науковий керівник:

доктор фізико-математичних наук, професор Воляр Олександр
Володимирович, СДУ, професор кафедри загальної фізики

Офіційні опоненти :

доктор фізико-математичних наук, професор Хижняк Анатолій
Іванович, Міжнародний центр "Інститут Прикладної Оптики",
зам. директора

доктор фізико-математичних наук, с. н. с. Бережинський Леонід
Йосипович, Інститут Фізики Напівпровідників НАН України,
пров.н.с.

Провідна організація:

Національний університет імені Тараса Шевченка, радіофізичний
факультет, Міністерство Освіти України, м. Київ

Захист дисертації відбудеться "22" січня 1998 р. о 14³⁰ год. на
засіданні спеціалізованої Вченої ради Д26.159.01 при Інституті
Фізики НАН України (252650, МСП, Київ -22, проспект Науки, 46)

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту
Фізики НАН України (Київ -22, проспект Науки, 46).

Автореферат розісланий "11" згрудня 1997 р.

Вчений секретар
спеціалізованої Вченої ради



Іщук В.А.

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00742627 (S)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дана робота належить до розділу оптики, зокрема, до сингулярної поляризаційної оптики волоконних світловодів. Вже перші дослідження особливих точок скалярного поля, в яких дійсна і уявна частини напруженості поля у вільному просторі перетворюються на нуль, виявили незвичайність поведінки полів з сингулярностями [1*]. Виявилось, що фазовий фронт світлових полів в деяких місцях має гелікоїдальну форму [1*,2*], а самі сингулярності можуть взаємодіяти як матеріальні частинки [2*]. Такі незвичайні світлові хвилі були виявлені як серед мод лазерних резонаторів (пучки Лагерра-Гаусса) [3*], так і серед полів, розсіяних дисперсними середовищами [4*]. Використання комп'ютерно-синтезованих голограм [5*] дозволило розширити спектр наукових досліджень, оскільки з'явилась можливість синтезувати сингулярні пучки з заданими властивостями. Всебічний аналіз лазерних пучків Лагерра-Гаусса виявив їх фундаментальну властивість — захоплювати мікрочастинки розміром 1-20 мкм і передавати їм момент імпульса [6*]. Такі властивості сингулярних лазерних пучків у вільному просторі знайшли широке застосування в оптичних пастках та оптичних пінцетах [7*].

Світлові пучки з випадково поділеними сингулярностями поля багатомодового оптичного волокна використовувалися для підвищення ефективності обернення хвильового фронту при вимушеному розсіянні Мандельштама-Бріллюена [4*]. Але тільки порівняно недавно вдалося шляхом поляризаційної фільтрації в полі випромінювання маломодових волокон виділити одиничні оптичні вихори (поля з чисто гвинтовими дислокаціями) [8*].

В полях оптичних волокон, зокрема маломодових, неможливо окремо досліджувати сингулярні та поляризаційні властивості випромінювання [9*]. Практичне використання оптичних волокон у сучасних приладах та пристроях квантової електроніки, волоконних лініях зв'язку та ін. вимагає вивчення як скалярних сингулярностей світла — дислокацій, так і векторних особливостей цих полів — дисклінацій. Крім того, хвильові властивості маломодових волокон дозволяють синтезувати оптичні поля з наперед заданими

поодинокими або численними векторними сингулярностями та керувати їх рухом.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконувалась в межах науково-дослідного проекту 2.3/686 ФФД ДКНТ України "Дослідження фізичної природи поляризаційно-променевих вихорів у неоднорідних середовищах" (1994-1995 рр., № держреєстрації 0194V029185), а також науково-дослідних робіт Міністерства освіти України "Дослідження еволюції оптичних і поляризаційно-променевих вихорів лазерного випромінювання при розповсюдженні крізь дуже дисперсні середовища, у тому числі крізь смугасту домінуючу структуру" (1995-1996 рр., № держреєстрації 0195V014659) та "Фізичні властивості векторних сингулярностей поля маломодових оптичних волокон" (1997-1999 рр., № держреєстрації 0197V000438) на кафедрі загальної фізики Сімферопольського державного університету.

Метою даної роботи було експериментальне і модельно-теоретичне дослідження еволюції векторних сингулярностей поля маломодового ступінчастого оптичного волокна.

Для досягнення цієї мети були поставлені наступні **задачі дослідження**:

1. Експериментально і модельно-теоретично дослідити динаміку дислокацій і дисклінацій поля лінійно поляризованих LP_{11} та циркулярно поляризованих CP_{11} модових комбінацій.
2. Вивчити особливості розповсюдження стійких CV і нестійких IV оптичних вихорів.
3. Теоретично дослідити збурюючу дію основної HE_{11} моди на CV і IV оптичні вихори.

Наукова новизна дисертації полягає в тому, що у даній роботі вперше були досліджені еволюція і взаємоперетворення дислокацій і дисклінацій направлених полів маломодового волокна, у якому збуджуються моди з орбітальними числами $l=0,1$. В результаті досліджень вперше:

- 1) Експериментально і модельно-теоретично показано, що еволюція сингулярностей полів лінійно поляризованих LP_{11} мод, що фізично спостерігаються, є ланцюгом подій народження, перетворення і знищення циркулярно поляризованих обертових та лінійно поляризованих стаціонарних вироджених крайових

дисклінацій, а також двох лінійно поляризованих крайових дислокацій.

2) Експериментально і теоретично показано, що реєстрація виродженої крайової та чисто гвинтової дислокацій поля випромінювання залежить від умов збудження та конструктивних параметрів волокна, від стану поляризації референтного пучка у схемі інтерферометра та від присутності і орієнтації осі пропускання поляризаційного аналізатору.

3) Експериментально і модельно-теоретично показано, що еволюція поля CP_{11} моди видається ланцюгом подій народження та знищення лінійно поляризованих вироджених крайових дисклінацій, що обертаються з різними швидкостями, однорідно циркулярно поляризованої виродженої крайової дислокації і однорідної лінійно поляризованої чисто гвинтової дислокації.

4). Експериментально і модельно-теоретично показано, що в маломодовому волокні можуть реалізовуватись стійкі CV та нестійкі IV оптичні вихори.

5). Модельно-теоретично показано, що структурна стійкість полів CV і IV вихорів залежить від збуджуючої дії поля фундаментальної HE_{11} моди.

Наукове і практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що дана робота розширює знання у галузі сингулярної оптики оптичних волокон. Розглянута еволюція особливостей полів маломодового оптичного волокна, що фізично реалізуються, значно доповнює уявлення про поведінку полів з сингулярностями хвильового фронту в неоднорідних середовищах. Знайдено спосіб збудження в маломодових волокнах стійких оптичних вихорів, які переносять циркулярну поляризацію вдовж волокна і не підвладні модовій дисперсії. Використання стійких оптичних вихорів для передачі інформації дасть можливість застосовувати у волоконних лініях оптичного зв'язку більш енергетично ємні маломодові волокна, що підвищить пропускну спроможність цих ліній за рахунок значного зниження модової дисперсії полів.

На захист виносяться наступні положення:

1. Метод збудження в круглому маломодовому оптичному волокні стійких CV і нестійких IV оптичних вихорів, лінійно

поляризованих LP_{11} та циркулярно поляризованих CP_{11} вихоревих комбінацій.

2. В полі LP_{11} вихоревої комбінації внаслідок дисперсії власних мод виникає перерозподіл енергії між ортогональними за поляризацією та положенням осей виродженими крайовими D_x і D_y дислокаціями і еволюція вироджених крайових C^{\pm} і L_x , L_y дисклінацій.

3. В полі CP_{11} вихоревої комбінації ступінчастого волокна дисперсія мод викликає перетворення циркулярно поляризованої виродженої крайової D^+ (D^-) дислокації в чисто гвинтову лінійно поляризовану LV_{+1} (LV_{-1}) дислокацію і еволюцію обертальних L_x і L_y дисклінацій на проміжних довжинах волокна, а також обертання осі чисто крайової дислокації залежно від циркуляції вхідної поляризації.

4. В хвильових полях маломодового волокна можуть реалізовуватися стійкі CV^+ і CV^- оптичні вихори, а також нестійкі IV вихори. Стійким CV вихорам відповідає пара цілих чисел: циркуляція поляризації і топологічний заряд, які мають однакові знаки: $(+1,+1)$, $(-1,-1)$. Нестійким вихорам відповідає пара чисел з протилежними знаками: $(+1,-1)$, $(-1,+1)$.

Особистий внесок автора виражається у проведенні експериментальних досліджень, участі у теоретичних розрахунках, обробці та інтерпретації одержаних результатів, а також у розробці прикладних програм для комп'ютерного розрахунку процесу еволюції полів маломодового волокна, що фізично спостерігаються. Зокрема, в роботах [1,2] дисертант приймала участь в проведенні експеримента і обговоренні результатів, проводила комп'ютерний розрахунок в роботах [5,7,8,9,10], проводила експериментальні дослідження в роботах [3-10], приймала участь в обговоренні результатів у всіх роботах, наведених в кінці автореферату.

Апробація роботи. Матеріали, викладені в дисертаційній роботі, доповідались і обговорювались на Міжнародній конференції "Photorefractive materials, effects, and devices" (Київ, Україна 1993), на 5-й Міжнародній школі-конференції "Нелінійна оптика рідких кристалів, фоторефрактивних та гетерогенних середовищ" (Севастополь, Україна, 1993), на "International conference on Holography and Correlation Optics" "HCO-2" (Чернівці, Україна,

1995), VI Міжнародній конференції “Nonlinear Optics of Liquid and Photorefractive Crystals” (Ай-Даніль, Крим, Україна, 1995), 1-й Міжнародній конференції “Singular Optics” (Партеніт, Крим, Україна, 1997).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 10 статей, список яких наведено в авторефераті.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновку і списку цитованої літератури. Її зміст викладено на 195 сторінках, 50 малюнках, які займають 50 сторінок, 7 таблицях, які займають 7 сторінок та в 87 бібліографічних назвах, які розташовані на 8 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність наведених у дисертації досліджень, сформульовані мета роботи, наукова новизна і положення, що виносяться на захист.

В першому розділі наводиться історична довідка з проблеми дослідження скалярних і векторних сингулярностей світлових полів, поданий аналітичний огляд сучасних уявлень про народження, еволюцію і знищення дислокацій і дисклінацій в електромагнітних хвильових процесах та розглянут стан питань формування і спостереження одиничних векторних сингулярностей в маломодових волокнах.

Поле оптичного волокна з осевою симетрією розподілу показника заломлення $n(R)$ в області оптичних частот в нульовому наближенні може бути описано скалярним хвильовим рівнянням. Його рішення вірні тільки для волокон з близькими значеннями показника заломлення серцевини і оболонки: $n_{co} \approx n_{cl}$ (слабонаправляючі волокна). Розв'язання векторного хвильового рівняння здійснюється способом послідовних наближень. Знаходять векторні поправки $\delta\beta_i$ до скалярних сталих розповсюдження мод. Саме ці поправки визначають процеси народження, еволюції та знищення дислокацій і дисклінацій векторного поля, а також умови розповсюдження власних вихорів оптичного волокна.

Далі розглядаються маломодові волокна з азимутальним індексом $l=0,1$, хвильоводний параметр V яких лежить у діапазоні

2.4 < V < 3.8. Точний аналіз рішень векторного хвильового рівняння для осесиметричного слабонаправляючого локально ізотропного волокна показує, що можливі дві поширені групи рішень, що характеризуються вибором поляризаційного базиса. У циркулярно поляризованому базисі CV вихори є власними модами волокна, ("CV" — аббревіатура англійського словосполучення "circular vortex"), а IV вихори можна розглядати як власні моди тільки в параболічному волокні. В інших типах волокон IV вихори є нестійкими хвильовими утвореннями внаслідок модової дисперсії (IV — аббревіатура англійського словосполучення "instability vortex"). Стіїкі CV і нестійкі IV вихори маломодового волокна характеризуються парою чисел: напрямком циркуляції кругової поляризації σ_z і топологічним зарядом l . Для CV вихора знаки цих чисел збігаються: ($l=+1, \sigma_z=+1$), ($l=-1, \sigma_z=-1$), а для IV вихора вони протилежні: ($l=+1, \sigma_z=-1$), ($l=-1, \sigma_z=+1$).

Аналізуються коефіцієнти збудження вихорів в ступінчастому волокні. Була складена матриця цих коефіцієнтів C_{lm} (l — топологічний заряд вихора в волокні, а m — топологічний заряд поля вільного простору). Симетрія елементів матриці C_{lm} вказує на резонансну природу збудження вихорів. Знайдено, що при $l=m$ і при співосному збудженні волокна збуджуються тільки вихори з однаковим топологічним зарядом ($C_{lm}=0, l \neq m$). При неспівосному збудженні волокна спектри збудження оптичних вихорів з m та $-m$ зеркально симетричні щодо $l=0$, тобто ефективність збудження вихідним m -м вихором l -го вихора волокна рівна ефективності збудження $-m$ -м вихором $-l$ -го вихора.

В другому розділі показано, що у реальному фізичному експерименті поля ступінчастих маломодових волокон складаються не з окремих власних мод, а з їх комбінацій. У цих комбінаціях існує точна відповідність між векторними сингулярностями та станом поляризації поля. Стан поляризації та сингулярності поля маломодового волокна визначаються умовами збудження та довжиною волокна.

Наводяться результати експериментальних і модельно-теоретичних досліджень еволюції полів LP₁₁ хвильової групи.

Для резонансного збудження цих симетрійних модових груп у вихідному лазерному пучку витримуються визначені

співвідношення між орієнтацією осі сингулярності та напрямком лінійної поляризації хвилі (див. табл.1).

При розповсюдженні вдовж волокна внаслідок явища модової дисперсії LP_{11} мода розпадається на власні моди, між якими виникають биття [10*]. Цей процес може бути представлений як обмін енергії між полями, що характеризуються $D_{x,e}$ і $D_{y,o}$, ($D_{x,o}$ і $D_{y,e}$) виродженими крайовими дислокаціями. На довжині биття структура поля LP_{11} моди відновлюється. На проміжних довжинах поле неоднорідно поляризоване і його структура безперервно змінюється. Для вивчення еволюції LP_{11} моди були введені C^+ , C^- та L_x , L_y дисклінації.





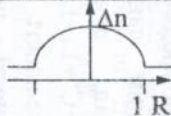
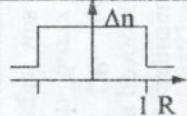
Циркулярно поляризованою C^+ дисклінацією названа векторна сингулярність поля, для якої виконується вимога: $Re(e^-) = Im(e^-) = 0$, а для C^- дисклінації — вимога: $Re(e^+) = Im(e^+) = 0$. Відповідно, для L_x дисклінації: $Re(e_y) = Im(e_y) = 0$, а для L_y дисклінації: $Re(e_x) = Im(e_x) = 0$. В процесі розповсюдження C^+ і C^- дисклінації обертаються назустріч одна одній та при зустрічі анігілюють, утворюючи D_x або D_y дислокацію, L_x та L_y дисклінації нерухомі.

Розповсюдження LP_{11} моди можна охарактеризувати послідовним ланцюгом процесів народження та знищення. Наприклад, для моди $LP_{11}^{e,x}$ маємо акт народження: $D_{x,e} \Rightarrow C^+ + C^- + L_x + L_y$ та акт знищення: $C^+ + C^- + L_x + L_y \Rightarrow D_{y,e}$.

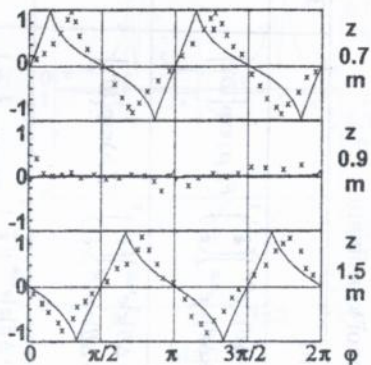
Чисельність комбінацій, у яких зустрічаються векторні сингулярності - дисклінації поля, призводить до неоднозначностей при реєстрації цих полів, якщо строго не задані умови спостереження. У вільному просторі до таких умов належать, наприклад, співвідношення між радіусами кривизни референтного і предметного пучків та напрямки їх сходження. Але при аналізі полів випромінювання оптичних волокон до числа параметрів, що задають тип векторної сингулярності поля додатково повинні входити параметри, які характеризують стан поляризації референтного пучка, а також необхідно враховувати наявність поляризатора на виході з волокна. Залежно від співвідношення цих параметрів у полі випромінювання волокна при строго заданих умовах збудження і довжині волокна виявляється вироджена крайова дислокація з орієнтацією осі у діапазоні $(0, 180^\circ)$ або чисто гвинтова дислокація з топологічним зарядом ± 1 .

Таблиця 1

Формування LP₁₁ модової комбінації

Вигляд поля e _i власних мод	LP ₁₁ модова комбінація	e _i (LP ₁₁)	Збуджуюче поле
$e_i(HE_{21}^{ev}) = \rho[\hat{x} \cos \phi - \hat{y} \sin \phi] F_1(\rho) \exp\{i\beta_1 z\}$ $e_i(TM_{01}) = \rho[\hat{x} \cos \phi + \hat{y} \sin \phi] F_1(\rho) \exp\{i\beta_2 z\}$	$e_i(LP_{11}^{e,x}) \Rightarrow$ $e_i(HE_{21}^{ev}) + e_i(TM_{01})$	$e_i = \rho \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \delta\beta_{21z} \\ i \sin \phi \sin \delta\beta_{21z} \end{pmatrix} F_1(\rho) \exp\{i\tilde{\beta}' z\}$	
$\beta_1 = \tilde{\beta} + \delta\beta_1, \beta_2 = \tilde{\beta} + \delta\beta_2,$ $\delta\beta_{21} = \frac{1}{2}(\delta\beta_2 - \delta\beta_1), \tilde{\beta}' = \tilde{\beta} + \frac{1}{2}(\delta\beta_2 + \delta\beta_1)$	$e_i(LP_{11}^{o,y}) \Rightarrow$ $e_i(HE_{21}^{ev}) - e_i(TM_{01})$	$e_i = \rho \begin{pmatrix} -i \cos \phi \sin \delta\beta_{21z} \\ -\sin \phi \cos \delta\beta_{21z} \end{pmatrix} F_1(\rho) \exp\{i\tilde{\beta}' z\}$	
$e_i(HE_{21}^{od}) = \rho[\hat{x} \sin \phi + \hat{y} \cos \phi] F_1(\rho) \exp\{i\beta_3 z\}$ $e_i(TE_{01}) = \rho[\hat{x} \sin \phi - \hat{y} \cos \phi] F_1(\rho) \exp\{i\beta_4 z\}$	$e_i(LP_{11}^{e,x}) \Rightarrow$ $e_i(HE_{21}^{od}) + e_i(TE_{01})$	$e_i = \rho \begin{pmatrix} \sin \phi \cos \delta\beta_{43z} \\ -i \cos \phi \sin \delta\beta_{43z} \end{pmatrix} F_1(\rho) \exp\{i\tilde{\beta}'' z\}$	
$\beta_3 = \tilde{\beta} + \delta\beta_3, \beta_4 = \tilde{\beta} + \delta\beta_4,$ $\delta\beta_{43} = \frac{1}{2}(\delta\beta_4 - \delta\beta_3), \tilde{\beta}'' = \tilde{\beta} + \frac{1}{2}(\delta\beta_4 + \delta\beta_3)$	$e_i(LP_{11}^{o,y}) \Rightarrow$ $e_i(HE_{21}^{od}) - e_i(TE_{01})$	$e_i = \rho \begin{pmatrix} -i \sin \phi \sin \delta\beta_{43z} \\ \cos \phi \cos \delta\beta_{43z} \end{pmatrix} F_1(\rho) \exp\{i\tilde{\beta}'' z\}$	
<p>параболічний профіль n(R)</p> $\delta\beta_1 = \delta\beta_3, \delta\beta_2 = \delta\beta_4 = 0, \delta\beta_{21} = \delta\beta_{43}$ $\delta\beta_1 = -\frac{(2\Delta)^{3/2}}{\rho_0 V}, F_1 = \text{Re} \exp\{-\frac{1}{2}VR^2\},$ $R = \rho / \rho_0$	 $F_1 = \rho F_1'$	<p>ступінчастий профіль n(R)</p> $\delta\beta_1 = \delta\beta_3, \delta\beta_4 = 0,$ $\delta\beta_1 = -\frac{(2\Delta)^{3/2} \tilde{W} \tilde{U}^2}{2\rho_0 V^3} \frac{K_1(\tilde{W})}{K_0(\tilde{W})},$ $\delta\beta_2 = -\frac{(2\Delta)^{3/2} \tilde{W} \tilde{U}^2}{\rho_0 V^3} \frac{K_1(\tilde{W})}{K_2(\tilde{W})}$	 $F_1 = \frac{J_1(\tilde{U}R)}{J_1(\tilde{U})}, R < 1$ $F_1 = \frac{K_1(\tilde{W}R)}{K_1(\tilde{W})}, R \geq 1$

Експериментально досліджувалась динаміка векторних сингулярностей в полі LP_{11} моди ($\lambda=0.6328$ мкм) у ступінчастому волокні з радіусом серцевини $\rho_0=3.5$ мкм, хвильоводним параметром $V=3.6$ та показником заломлення серцевини $n_{co}=1.475$. Для забезпечення необхідного розподілу напруженості поля LP_{11} моди використовувався фазовий транспарант, який дозволяє перетворювати фундаментальний Гауссовий пучок у пучок Ерміта-Гаусса (TEM_{01} моду). Оптичне волокно співосно збуджувалось $20\times$ мікрооб'єктивом. Експеримент підтвердив існування C^+ і C^- дисклінацій. На мал.1 представлені теоретичні та експериментальні криві розподілу ступеня еліптичності Q $LP_{11}^{e,x}$ моди в залежності від азимутальної координати ϕ для різних довжин волокна z .



Мал.1





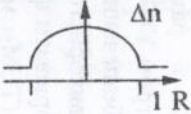
В полі випромінювання LP_{11} моди однозначно можна визначити тип скалярної сингулярності тільки для довжин волокна, кратних чверті довжини биття.

В розділі 3 показано, що співосне збудження маломодового волокна циркулярно поляризованим пучком Ерміта-Гаусса GH_{10} призводить до реалізації у наведеному каналі CP_{11} хвильової комбінації. Вигляд полів CP_{11} групи приведено у табл.2.

Знайдено, що в градієнтних волокнах, зокрема, у маломодових волокнах з ступінчастим профілем показника заломлення, в полі CP_{11} модової комбінації формується новий тип векторних сингулярностей - обертальні L_x і L_y дисклінації. Лінійно поляризовані L_x і L_y дисклінації обертаються в одному напрямку із різними швидкостями. В перерізах, кратних $z=m\pi/2\Delta\beta$ положення L_x і L_y дисклінацій співпадає. Відповідні їм лінійні поляризації також обертаються з різними швидкостями і у перерізах $z=(2m+1)\pi/4\Delta\beta$ їх напрямки співпадає. У даних перерізах в процесі взаємодії L_x і L_y дисклінацій народжується циркулярно поляризоване поле з

Таблиця 2

Формування CP_{11} модової комбінації

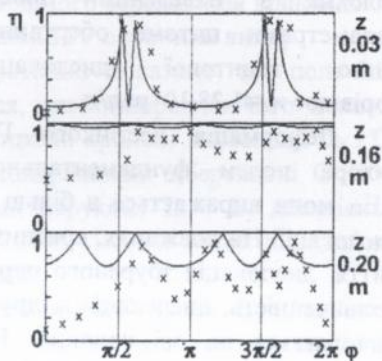
CP_{11} модова комбінація	$e_i(CP_{11})$	Збуджуюче поле
$e_i(CP_{11}^{e,+}) \Rightarrow$ $e_i(LP_{11}^{e,x}) + ie_i(LP_{11}^{e,y})$	$e_i = \rho \begin{pmatrix} \cos[\phi - \delta\beta_{21}z] + \cos[\phi - (\delta\beta_{21} + \Delta\beta)z] e^{i\Delta\beta z} \\ \cos[\phi + \delta\beta_{21}z] - \cos[\phi + (\delta\beta_{21} + \Delta\beta)z] e^{i\Delta\beta z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{e}^+ \\ \hat{e}^- \end{pmatrix}^T F_1(\rho) \exp\{i\tilde{\beta}'z\}$	
$e_i(CP_{11}^{o,+}) \Rightarrow$ $e_i(LP_{11}^{o,x}) - ie_i(LP_{11}^{o,y})$	$e_i = \rho \begin{pmatrix} \sin[\phi - \delta\beta_{21}z] + \sin[\phi - (\delta\beta_{21} + \Delta\beta)z] e^{i\Delta\beta z} \\ \sin[\phi + \delta\beta_{21}z] - \sin[\phi + (\delta\beta_{21} + \Delta\beta)z] e^{i\Delta\beta z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{e}^+ \\ \hat{e}^- \end{pmatrix}^T F_1(\rho) \exp\{i\tilde{\beta}'z\}$	
$e_i(CP_{11}^{e,-}) \Rightarrow$ $e_i(LP_{11}^{e,x}) - ie_i(LP_{11}^{e,y})$	$e_i = \rho \begin{pmatrix} \cos[\phi - \delta\beta_{21}z] - \cos[\phi - (\delta\beta_{21} + \Delta\beta)z] e^{i\Delta\beta z} \\ \cos[\phi + \delta\beta_{21}z] + \cos[\phi + (\delta\beta_{21} + \Delta\beta)z] e^{i\Delta\beta z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{e}^+ \\ \hat{e}^- \end{pmatrix}^T F_1(\rho) \exp\{i\tilde{\beta}'z\}$	
$e_i(CP_{11}^{o,-}) \Rightarrow$ $e_i(LP_{11}^{o,x}) + ie_i(LP_{11}^{o,y})$	$e_i = \rho \begin{pmatrix} \sin[\phi - \delta\beta_{21}z] - \sin[\phi - (\delta\beta_{21} + \Delta\beta)z] e^{i\Delta\beta z} \\ \sin[\phi + \delta\beta_{21}z] + \sin[\phi + (\delta\beta_{21} + \Delta\beta)z] e^{i\Delta\beta z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{e}^+ \\ \hat{e}^- \end{pmatrix}^T F_1(\rho) \exp\{i\tilde{\beta}'z\}$	
параболічний профіль $p(R)$ $n^2 = n_{co}^2(1 - 2\Delta R^2)$ $\Delta\beta = 0$ $F_1 = \rho F_1'$	$e_i(CP_{11}^{e,+}) = \hat{e}^+ \rho \cos(\phi - \delta\beta_{21}z) F_1(\rho) \exp\{i\tilde{\beta}'z\},$ $e_i(CP_{11}^{o,+}) = \hat{e}^+ \rho \sin(\phi - \delta\beta_{21}z) F_1(\rho) \exp\{i\tilde{\beta}'z\},$ $e_i(CP_{11}^{e,-}) = \hat{e}^- \rho \cos(\phi + \delta\beta_{21}z) F_1(\rho) \exp\{i\tilde{\beta}'z\},$ $e_i(CP_{11}^{o,-}) = \hat{e}^- \rho \sin(\phi + \delta\beta_{21}z) F_1(\rho) \exp\{i\tilde{\beta}'z\}$	 $R = \frac{\rho}{\rho_0}$

виродженою крайовою або лінійно поляризоване поле з чисто гвинтовою дислокаціями. Орієнтація осі дислокації і орієнтація напрямку лінійної поляризації в полі випромінення описують хвильоводний оптичний ефект Магнуса або топологічну фазу Беррі.

Для експериментального дослідження динаміки векторних сингулярностей в полі CP_{11} моди використовувалася та ж методика, що й для LP_{11} моди.

В процесі експерименту вимірювався ступінь лінійної поляризації η на проміжних довжинах волокна z в залежності від азимутальної координати ϕ (мал.2).

Експериментальні дані узгоджуються з модельно-теоретичними розрахунками. Також на довжині волокна $L=0.65$ м при зміні циркуляції поляризації вхідного пучка був виявлений зеркальний поворот осі крайової дислокації в полі, що відповідає хвильоводному аналогу ефекта Магнуса.

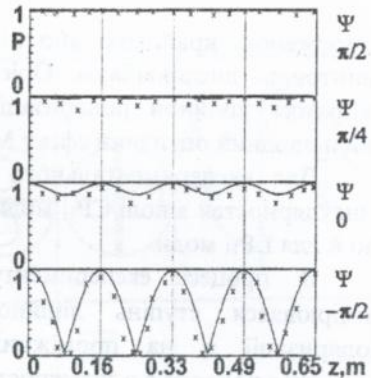


Мал.2

В розділі 4 експериментально і модельно-теоретично досліджувалась проблема збудження і розповсюдження одиничних оптичних CV і IV вихорів крізь маломодове оптичне волокно. Розповсюдження IV вихора можна представити як процес биття $\hat{e}^+ F_l(R) \exp\{-i\phi\}$ і $\hat{e}^- F_l(R) \exp\{+i\phi\}$ парціальних вихорів, внаслідок якого для вихора IV_{-1}^+ на чверті довжини биття енергія із парціального вихора з параметрами $(\sigma_z=+1, l=-1)$ перекачується у вихор $(\sigma_z=-1, l=+1)$. На половині довжини биття енергія переважується у вхідний вихор, але з фазовим додатком π . На проміжних довжинах суперпозиція вихорів буде формувати неоднорідний стан поляризації поля.

Досліджувався процес зміни ступеня поляризації Р CV та IV вихорів в залежності від довжини волокна z при збуренні стану поляризації. Результати приведені на мал.3.

Дія HE_{11} моди, що обурює поля стійкого CV вихора, виражається у зміщенні положення чисто гвинтової дислокації щодо осі волокна та її обертанні у процесі розповсюдження. Розрахунок показує, що для волокна з наведеними вище параметрами питоме обертання чисто гвинтової дислокації дорівнює $w_z = 1.38 \cdot 10^4$ рад/м.



Мал.3

Деформація нестійкого IV вихора полем фундаментальної

HE_{11} моди виражається в більш складному поведженні гвинтової дислокації. На довжинах, кратних непарному числу чверті довжини биття, дислокація збуреного парціального вихора витісняється на нескінченність, дислокація ж другого парціального вихора завжди залишається на осі волокна. Навіть малі величини параметра збурення викликають у перерізах волокна, близьких до вказаних вище, великі радіальні зміщення чисто гвинтової дислокації збуреного парціального вихора.

Експериментально досліджувався процес збудження і розповсюдження CV і IV вихорів у маломодовому волокні, параметри якого наведені вище. Щоб узгодити поле лазерного пучка з полем оптичного волокна використовувалась комп'ютерна голограма чисто гвинтової дислокації, одержана способом, описаним в роботі [5*]. У дальньому полі дифракції виділявся пучок Лагерра-Гаусса з топологічним зарядом $|m|=1$, який співосно збуджував волокно. При вивченні структури поля на різних довжинах волокна було знайдено, що стійкий CV вихор передавався без зміни поляризаційної та топологічної структури на віддаль понад 5 м. Ступінь поляризації нестійкого IV вихора періодично змінювалася від 0.92 до 0.05.

Для збудження нестійкого IV вихора достатньо було повернути пластинку $\lambda/4$, яка знаходилась перед волокном, на 90° або повернути транспарант, що формував оптичний вихор у вільному просторі, на 180° .

У висновках сформульовані основні результати роботи:

1. В результаті аналізу рішень векторного хвильового рівняння для неоднорідного осесиметричного середовища показано, що пучкам Ерміта-Гаусса GH_{10} однорідного середовища відповідають модові комбінації типу лінійно поляризованих LP_{11} мод і циркулярно поляризованих CP_{11} мод маломодового волокна; пучкам Лагерра-Гаусса GL_{0m} однорідного середовища відповідають стійкий оптичний CV вихор і нестійкий IV оптичний вихор.

2. Експериментально і теоретично показано, що поле LP_{11} моди, що фізично спостерігається, слабонаправляючого волокна містить лінійно поляризовані вироджені крайові дислокації D_x і D_y , вироджені крайові циркулярно поляризовані обертальні C^+ і C^- дисклінації і лінійно поляризовані нерухомі L_x і L_y дисклінації. Розповсюдження хвилі проявляється як ланцюг подій народження та знищення дислокацій і дисклінацій.

3. Співосний лінійно поляризований пучок Ерміта-Гаусса GH_{10} збуджує в маломодовому волокні фізично спостерігаєму LP_{11} моду що має у площині збудження вироджену крайову дислокацію. При розпаді D_x дислокації народжуються C^+ , C^- , L_x і L_y дисклінації. C^+ і C^- дисклінації, які рухаються назустріч одна одній, анігілюють на осі x спільно з L_x дисклінацією, породжуючи D_y дислокацію.

4. Співосний циркулярно поляризований пучок Ерміта-Гаусса GH_{10} збуджує у ступінчастому маломодовому волокні CP_{11} модову комбінацію, що фізично спостерігається. В процесі розповсюдження CP_{11} моди D^+ (D^-) вироджена крайова дислокація розпадається на дві обертальні з різними швидкостями лінійно поляризовані L_x і L_y дисклінації. Взаємодія полів з цими дислокаціями викликає обертання осі виродженої крайової дислокації на довжинах, кратних половині довжини биття, та обертання площини лінійної поляризації чисто гвинтової дислокації в перерізах, кратних непарному числу чверті довжини биття.

5. Співосний циркулярно поляризований пучок Лагерра-Гаусса GL_{01} збуджує в маломодовому волокні стійкий CV або нестійкий IV вихор. Якщо знак топологічного заряду пучка l і знак циркуляції поляризації σ_z однакові, то збуджується стійкий CV вихор. При умові, що знаки σ_z і l різні, збуджується нестійкий IV вихор.

6. Стійкий CV вихор однозначно характеризується парою чисел: топологічним зарядом l і циркуляцією поляризації σ_z , сума яких $l+\sigma_z \neq 0$. В процесі розповсюдження CV вихора залишається незмінною структура його поля - вихор не має модової дисперсії і в будь-якому перерізі волокна є однорідно циркулярно поляризованим.

7. Нестійкий IV оптичний вихор в початковому перерізі волокна характеризується парою чисел ($l=+1, \sigma_z=-1$) або ($l=-1, \sigma_z=+1$), їх сума $l+\sigma_z=0$. У процесі розповсюдження IV вихора, внаслідок модової дисперсії, виникає перекачка енергії між станами ($l=-1, \sigma_z=+1$) і ($l=+1, \sigma_z=-1$).

8. Поперечне поле CV вихора переносить чисто гвинтову дислокацію з топологічним зарядом $|l|=1$, а продовжне поле - чисто гвинтову дислокацію з топологічним зарядом $l+\sigma_z=2$. Поперечне поле IV вихора переносить дві чисто гвинтові дислокації з протилежними знаками l і σ_z , локалізовані на осі волокна, а продовжна компонента поля IV вихора є гладкою та дислокацій не переносить ($l+\sigma_z=0$).

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНІ В РОБОТАХ:

1. Воляр А.В., Лапаева С.Н., Фадеєва Т.А. Изменение знака топологического заряда оптических вихрей поля многомодового волокна// Письма в ЖТФ. - 1994. - Т.20. - В.5. - С.27-31.
2. A. Alexiev, E. Modnikova, T. Fadeyeva, S. Lapayeva, A. Volyar Interaction of the topological phase and the Magnus effect in a multimode fiber// Proc. SPIE. - 1995. - V.2795. - P.216-220.
3. Воляр А.В., Фадеєва Т.А. Вихревая природа мод оптического волокна: I. Структура собственных мод// Письма в ЖТФ. - 1996. - Т.22. - В.8. - С.57-62.
4. Воляр А.В., Фадеєва Т.А. Вихревая природа мод оптического волокна: II. Распространение оптических вихрей// Письма в ЖТФ. - 1996. - Т.22. - В.8. - С.63-67.
5. Воляр А.В., Фадеєва Т.А. Вихревая природа мод оптического волокна: III. Возбуждение направляемых вихрей// Письма в ЖТФ. - 1996. - Т.22. - В.17. - С.69-74.

6. Воляр А.В., Фадеева Т.А. Вихревая природа мод оптического волокна: IV. Ортогональные преобразования топологического заряда и циркулярной поляризации оптического вихря // Письма в ЖТФ. - 1996. - Т.22. - В.17. - С.75-87.
7. Воляр А.В., Фадеева Т.А. Динамика дислокаций и дисклинаций поля маломодового волокна: I. Рождение и аннигиляция S^{\pm} дисклинаций // Письма в ЖТФ. - 1997. - Т.23. - В.2. - С.20-27.
8. Воляр А.В., Фадеева Т.А. Динамика дислокаций и дисклинаций поля маломодового волокна: II. Чистые типы сингулярностей // Письма в ЖТФ. - 1997. - Т.23. - В.3. - С.7-13.
9. Воляр А.В., Фадеева Т.А., Решитова Х.М. Динамика дислокаций и дисклинаций поля маломодового волокна: III. Циркулярно поляризованные SR_{11} моды и L дисклинации // Письма в ЖТФ. - 1997. - Т.23. - В.5. - С.14-20.
10. Воляр А.В., Фадеева Т.А., Решитова Х.М. Динамика дислокаций и дисклинаций поля маломодового волокна: IV. Формирование оптического вихря // Письма в ЖТФ. - 1997. - Т.23. - В.5. - С.70-75.

ЛИТЕРАТУРА, ЦО ЦИТУВАЛАСЬ:

- 1*. Nye J.F., Berry M.V. Dislocations in wave trains // Proc. R. Soc. Lond. A. - 1974. - V. 336. - P.165-190.
- 2*. Berry M. Singularities in waves and rays // Physics of defects. Les Houches Session XXXV. Amsterdam. North-Holland: - 1980. - P.453-543.
- 3*. Harris M., Hill C.A., Vaughan J.M. Optical helices and spiral interference fringes // Opt. Comm. - 1994. - V.106. - P.161-166.
- 4*. Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. Обращение волнового фронта. - М.: Наука, 1985. - 248 с.
- 5*. Баженов В.Ю., Васнецов М.В., Соскин М.С. Лазерные пучки с винтовыми дислокациями волнового фронта // Письма в ЖЭТФ. 1990. Т.52. В.8. С.1037-1039.
- 6*. He H., Friese M.E., Heckenberg N.R., Rubinsztein-Dunlop H. Direct observation of transfer of angular momentum of absorptive particles from a laser beam with a phase singularity // Phys Rev. Lett. 1995. V.75. No.5. P.826-829.

7*. Simpson N.B., Dholakia K., Allen L., Padgett M.J. Mechanical equivalence of spin and orbital angular momentum of light: an optical spanner// Opt. Lett. - 1997. - V.22. - No.1. - P.52-54.

8*. Даршт М.Я., Зельдович Б.Я., Катаевская И.В., Кундикова Н.Д. Формирование единичной дислокации волнового фронта// ЖЭТФ. - 1995. - Т.107. - В.5. - С.1464-1472.

9*. Воляр А.В., Быков А.М. Поляризаційна оптика багатомодових світловодів// Оптика і спектроскопія. - 1984. - Т.56. - В.5. - С.894-899.

10*. Снайдер А., Лав Дж. Теорія оптичних світловодів. - М: Радио і зв'язь, 1987. - 656 с.

Фадесва Т.А. Еволюція дислокацій і дисклінацій поля маломодового волокна.- Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.05 - Оптика, лазерна фізика.- Інститут фізики НАН України, Київ, 1997.

В роботі проведені дослідження еволюції дислокацій і дисклінацій полів LP_{11} і CP_{11} мод, а також CV і IV оптичних вихорів. Показано, що структура поля CV вихора не змінюється при розповсюдженні крізь маломодове волокно та не має модової дисперсії. Знайдено, що результати експериментальної реєстрації даного типу векторних дислокацій в полі випромінення волокна залежать від довжини волокна, стану поляризації збуджуючого і референтного пучків, наявності поляризаційного аналізатора і орієнтації його осі пропускання.

Ключові слова: маломодове оптичне волокно, лазерне випромінення, дислокація, дисклінація, топологічний заряд, оптичний вихор, стан поляризації.

Фадеева Т.А. Эволюция дислокаций и дисклинаций поля маломодового волокна.- Рукопись

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 - Оптика, лазерная физика, Институт физики НАН Украины, Киев, 1997.

В работе проведены исследования эволюции дислокаций и дисклинаций полей LP_{11} и CP_{11} мод, а также CV и IV оптических вихрей. Показано, что структура поля CV вихря не изменяется при распространении через маломодовое волокно и не обладает модовой дисперсией. Найдено, что результаты экспериментальных наблюдений данного типа векторных дислокаций в поле излучения волокна зависят от длины волокна, состояния поляризации возбуждающего и опорного пучков, наличия поляризационного анализатора и ориентации его оси пропускания.

Ключевые слова: маломодовое оптическое волокно, лазерное излучение, дислокация, дисклинация, топологический заряд, оптический вихрь, состояние поляризации.

Fadeyeva T.A. Evolution of dislocations and disclinations of the low-mode fiber field.- Manuscript.

Thesis for a Candidate of Science Degree in Physics and Mathematics by speciality 01.04.05 - Optics, Laser Physics. The Institute of Physics of National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, 1997.

The evolution of dislocations and disclinations of LP_{11} , CP_{11} modes and CV, IV optical vortices fields is studied in this work. The CV vortex field structure don't change at the transmitting in the low-mode fiber and it has not the mode dispersion. The experimental observation results of the given kind of the vector dislocations in low-mode fiber field depends on the fiber length, the polarization state of the exiting and the referent beams; the being polarization analyzer and orientation of its axis transmission.

Key words: low-mode optical fiber, laser radiation, dislocation, disclination, topological charge, optical vortex, polarization state.

АВ 39.129

Подписано к печати 08.12.97
Объем 1.25 п.л.

Формат 60x84/16
Тираж 100 экз.

Бумага тип ОП
Заказ 0812/2

Симферопольский государственный университет им. М. В. Фрунзе
Информационно-издательский отдел
333036, г. Симферополь, ул. Ялтинская, 4