

Мы объясняем подобное поведение взаимодействием экситонных и трионных мод. Благодаря тому, что энергия связи триона мала по сравнению с энергией связи экситона и близка к однородному и неоднородному уширению экситона, можно рассматривать экситонное и трионное состояния как имеющие почти одну и ту же энергию. Тогда экситон может легко превратиться в трион, захватив дополнительный электрон, а трион может легко превратиться в экситон, потеряв электрон. Если такой процесс является когерентным, то имеет место смешивание мод. Теперь нельзя считать экситон и трион независимыми возбуждениями, а следует рассматривать смешанные экситон-трионные моды. С ростом плотности электронов такое перемешивание экситонных и трионных возбуждений становится все сильнее, что проявляется в перераспределении силы осциллятора экситона и триона, а также в увеличении энергетического зазора между этими двумя линиями.

Нами была построена теория таких смешанных экситон-трионных возбуждений, показавшая хорошее количественное и качественное согласие с экспериментом.

Список литературы

1. Kheng K et al. *Phys. Rev. Lett.* **71** 1752 (1993)
2. Yakovlev D R et al. *Phys. Rev. Lett.* **79** 3974 (1997)
3. Astakhov G V et al. *Phys. Rev. B* **60** R8485 (1999)
4. Yakovlev D R et al., in *Nanostructures: Physics and Technology* (Seventh Intern. Symp. St. Petersburg, Russia, 1999) p. 393
5. Wittaker D M, Shields A J *Phys. Rev. B* **56** 15185 (1997)
6. Kocherehko V P et al., in *Proc. of 23th Intern. Conf. on the Physics of Semiconductores* (Berlin, Germany, 1996) p. 1943
7. Kochereshko V P et al. *Superlattices and Microstructures* **21** 269 (1998)
8. Kochereshko V P et al. *J. Cryst. Growth* **184/185** 826 (1998)

PACS numbers: 79.60.Jv, 85.30.Vw, **85.60.-q**

Оптические свойства напряженных гетероструктур на основе $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и $\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{C}_y$

З.Ф. Красильник, А.В. Новиков

1. Введение

В результате исследований самых разнообразных низкоразмерных структур на основе кремния в последние годы появилось и закрепилось направление, именуемое кремниевая оптоэлектроника (Si-based optoelectronics). Кремний и германий, как известно, являются непрямозонными материалами. Процессы излучательной рекомбинации в них затруднены. Однако в низкоразмерных структурах на основе кремния и германия можно ожидать проявления целого ряда новых особенностей в излучении света.

В настоящее время развивается несколько направлений исследований новых механизмов эффективной люминесценции света кремнием. Первое из них — это разнообразные структуры на основе пористого кремния и нанокластеров кремния, встроенных в более широкозонный материал. На пористом кремнии получена фото- и электролюминесценция в области энергий от 1 до 2,5 эВ [4], созданы первые макеты интегральных схем со

светодиодами, включенными в цепи управляющих транзисторов [5].

Второе направление — это кремний, легированный редкоземельными элементами. Излучение света связано с внутрицентровыми переходами в редкоземельных элементах. На кремнии, легированном эрбием, получена фото- и электролюминесценция в области 1,55 мкм в широком интервале температур, вплоть до комнатной [6]. Для создания высоколегированных структур со сложным профилем очень удачной оказалась МЛЭ-технология с сублимационными источниками [7]. Появилось сообщение о наблюдении лазерной генерации с оптической накачкой [8].

Третье направление — гетероструктуры с квантовыми ямами и квантовыми точками на основе прямозонных полупроводников группы A_3B_5 , выращенные на кремниевой подложке. В работе [9] представлены первые результаты наблюдения фотолюминесценции с длиной волны 1,3 мкм на структуре, представляющей собой спонтанно сформированные квантовые точки InAs на кремниевой подложке.

Наконец, еще одно активно разрабатываемое направление — это наноструктуры $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и $\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{C}_y$ на кремнии. Особый интерес вызывают структуры с самоорганизующимися наноструктурами $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, в которых наблюдается интенсивная фотолюминесценция в области 1,55 мкм [10].

Ниже излагаются результаты исследований роста самоорганизующихся наноструктур $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ на $\text{Si}(100)$. Обсуждаются особенности фотолюминесценции структур с наноструктурами, приводится описание механизма квазипрямозонных оптических переходов в них. Наряду с законченными результатами исследований затрагиваются вопросы проблемного характера, касающиеся прямозонной излучательной рекомбинации в низкоразмерных структурах на основе твердых растворов $\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{C}_y$.

2. Рост и характеристика наноструктур $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ на $\text{Si}(100)$

Исследуемые структуры выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на кремниевых подложках, ориентированных в плоскости (100), при температуре роста 550–700 °С. Кремний и германий испарялись с помощью электронных пушек. Первоначально на подложке выращивался буферный слой кремния толщиной около 200 нм. Далее осаждался слой германия с эквивалентной толщиной до 13 условных монослоев (МС). Данные структуры использовались для исследования параметров островков с помощью атомно-силового и электронного микроскопов. Для проведения оптических исследований структуры закрывались слоем кремния толщиной 100 нм.

Рост германия на кремнии при 700 °С хорошо описывается механизмом Странского–Крастанова. Гетерограница Si и Ge является в общем случае напряженной вследствие несоответствия периодов решетки гетеропары, отличающихся на 4,2 %. Псевдоморфный рост первых 4–5 МС германия (смачивающего слоя) сменяется, при последующем осаждении германия, на рост трехмерных образований — так называемых hut-кластеров [11], т.е. наноструктур, представляющих собой четко ограниченные пирамидки с плоскостями типа {105} в качестве боковых граней.

При дальнейшем увеличении количества осажденного германия происходит пропорциональный рост линейных размеров hut-островков, пока последние не достигнут некоторого критического объема (порядка $3 \times 10^5 \text{ nm}^3$ для наших условий роста). Для минимизации упругих напряжений островкам с большим объемом энергетически более выгодно иметь отношение высоты к латеральному размеру большее, чем у hut-островков. Островки с объемом больше критического имеют куполообразную форму, их боковые грани ориентированы в плоскостях $\{113\}$ и $\{102\}$ (dome-островки) [12].

При еще большем увеличении количества осажденного германия латеральные размеры куполообразных островков меняются слабо, рост островков идет в основном за счет увеличения высоты dome-островков. Но и высота куполообразных островков имеет некоторое предельное значение. Благодаря этому можно получить массив наноструктур с высокой однородностью по размерам при окончании перехода hut-островков в dome-островки и достижения dome-островками предельных размеров. В наших условиях роста это происходит при осаждении германия в количестве, достаточном для роста 11 МС. Дисперсия размеров наноструктур при таком количестве осажденного германия не превышала 10 % при средней их высоте 20 нм, поперечных размерах 100 нм и поверхностной плотности порядка $3 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$ (рис. 1).

По данным атомно-силовой и электронной микроскопии суммарный объем dome-островков превышает количество осажденного германия. Это связано с объемной и поверхностной диффузией кремния в островки в процессе их роста. Последнее установлено методами комбинационного рассеяния света и рентгенодифракционным анализом. Объемная диффузия осуществляется со стороны буферного слоя кремния через основания островков. Поверхностная же диффузия возникает в результате прокалывания смачивающего слоя по периметру основания островка, где максимальны силы упругой деформации [3]. При этом кремний диффундирует из буферного слоя в островки через их боковые грани. Проведенные исследования показали, что доля кремния в островках может достигать до 50 %. Это обстоятельство используется ниже для объяснения спектров фотолюминесценции.

3. Излучательная рекомбинация в $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$

Разрывы зоны проводимости и валентной зоны на гетерогранице $\text{Si}(100)$ и твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ направлены таким образом, что потенциальная яма для дырок расположена в $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, а для электронов — в кремнии. Из-за упругой деформации снимается вырождение шести эквивалентных Δ -долин, так что дно зоны проводимости формируют двукратно вырожденные 2Δ -долины, вытянутые в направлении роста $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ на $\text{Si}(100)$. В этом же направлении, но уже в пространстве импульсов смещена зона проводимости кремния относительно потолка валентной зоны $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$.

Если по каким-то причинам электроны в кремнии локализованы вблизи гетерограницы (например, находятся в квантовой яме), то из соотношений неопределенности следует, что квазиимпульс \mathbf{k} электронов в направлении смещения указанных зон друг относительно друга может принимать произвольные значения, в том числе и $\mathbf{k} = 0$. Иными словами, становится отличной от нуля

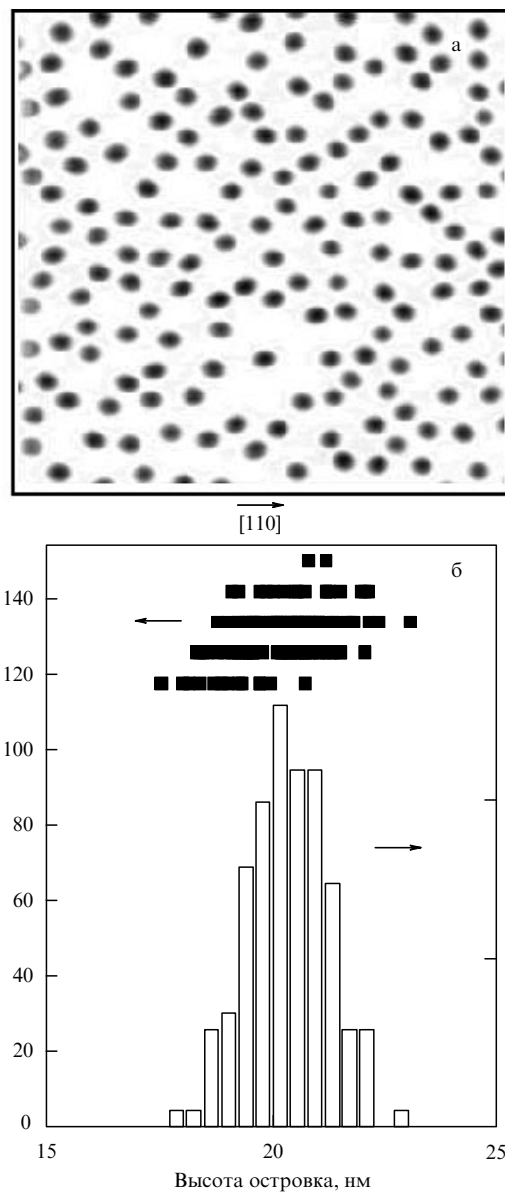


Рис. 1. Снимок образца, содержащего 11 МС Ge, в атомно-силовом микроскопе (а) и результаты его обработки (б). Показаны зависимость латерального размера островка от его высоты и гистограмма распределения островков по высотам. Размер снимка $2,5 \times 2,5 \text{ мкм}^2$; снимок приведен в инверсном виде.

вероятность прямого в пространстве импульсов межзонного перехода электронов из зоны проводимости кремния в валентную зону $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с туннелированием в реальном пространстве через гетерограницу [1, 2].

Выращиваемые гетероструктуры $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ с самоорганизующимися наноструктурами обладают проводимостью p -типа с объемной концентрацией носителей порядка $8 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Дырки из кремния аккумулируются в потенциальные ямы в наноструктурах, заряжая их положительно. В результате кулоновского отталкивания дырки должны сосредоточиться вдоль гетерограниц островков. Положительный заряд островков приводит к изгибу дна зоны проводимости и создает квантовую яму для электронов в кремнии вблизи гетероперехода (см. вставку на рис. 2). Тем самым оказывается возможной квазипрямозонная излучательная рекомбинация электронов из кремния с дырками в наноструктурах, описанная

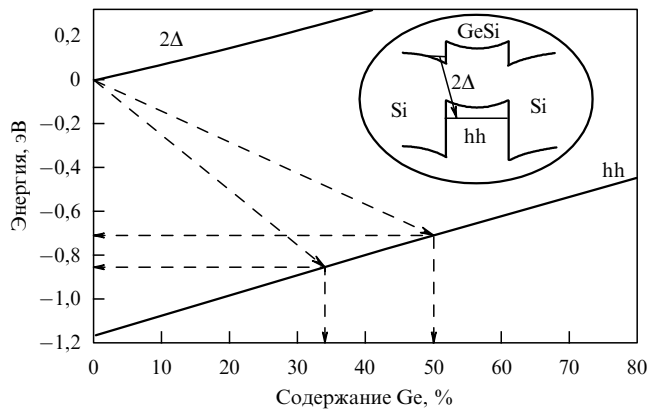


Рис. 2. Зависимость положения уровня 2Δ -электронов и тяжелых дырок (hh) от содержания германия в островках. Стрелками показаны область энергий, в которой наблюдается фотолуминесценция от островков, и соответствующий этим энергиям состав островков. На вставке представлена схема квазипрямых оптических переходов (см. текст).

выше. На рисунке 2 приведен расчет энергии такого перехода в зависимости от состава твердого раствора.

Спектры фотолуминесценции, записанные при температуре $T = 4,2$ К, приведены на рис. 3. Линия фотолуминесценции островков наблюдается в области энергий $0,7-0,85$ эВ, что соответствует проведенным расчетам излучательной рекомбинации для островков, содержащих примерно 50% кремния. Длинноволновое крыло линии фотолуминесценции приходится на энергии, меньшие, чем ширина запрещенной зоны объемного германия, что можно объяснить лишь рекомбинацией электронов кремния и дырок в наноструктурах с туннелированием через гетерограницу.

Наряду с сигналом от наноструктур в области энергий порядка 1 эВ наблюдаются фоновый и бесфонный пики фотолуминесценции от двумерного смачивающего слоя германия, толщина которого составляет 4–5 МС (рис. 3). По мере осаждения германия (7–10 МС) фотолуминесценция от двумерного смачивающего

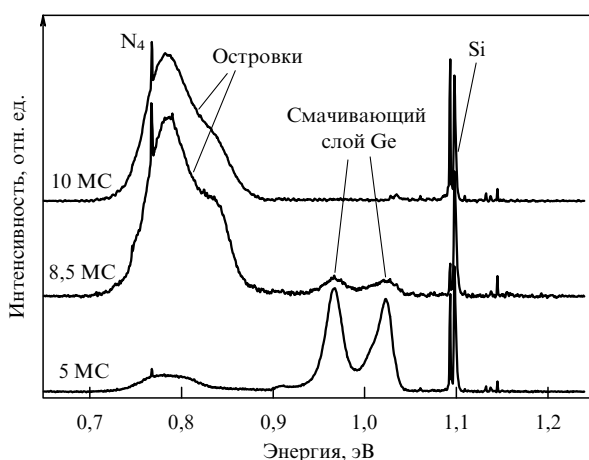


Рис. 3. Зависимость спектров фотолуминесценции структур с наноструктурами от толщины осажденного германия. Толщина слоя Ge (в МС) указана рядом с соответствующим спектром; N_4 — линия от примесного комплекса.

щего слоя гаснет: растет поверхностная плотность наноструктур, так что фотовозбужденные в слое экситоны успевают продиффундировать в островки и уже в них рекомбинировать.

Даже для структуры с однородным по размерам распределением наноструктур линия их фотолуминесценции достаточно широкая (около 60 мэВ). Неоднородное уширение линии, как представляется, связано с разбросом состава твердого раствора и упругих напряжений в наноструктурах из-за неупорядоченного расположения их в плоскости роста. С понижением температуры роста линия фотолуминесценции сдвигается в область меньших энергий, что связано с увеличением доли германия в островках с 50 до 85% при понижении температуры роста от 700 до 550 °С. Состав в данном случае контролировался рентгенографическими и рамановскими измерениями.

4. Гетероструктуры

на основе твердого раствора $Si_{1-x}Ge_xC_y$

В гетероструктурах на основе $SiGe/Si(100)$ потенциальный барьер для электронов приходится на наноструктуру и крайне низок, в то время как яма для дырок достаточно глубока. По этой причине локализовать электроны в кремнии вблизи гетерограницы с островками сложно. Иными словами, перекрытие волновых функций электронов и дырок на гетерогранице в общем случае незначительно для того, чтобы рассчитывать на эффективную прямозонную рекомбинацию локализованных в кремнии электронов с туннелированием через гетерограницу. Добавление в твердый раствор небольшого количества углерода (до 3–5%) может радикально изменить структуру энергетических зон и даже сменить характер гетерограницы (II рода \rightarrow I рода) [13].

Разрывы зон для гетерограницы Si и $Si_{1-x}Ge_xC_y$ в данной работе определялись теоретически на основании модели, предложенной в [14, 15]. В этой модели вычисляются энергии валентных зон по разные стороны от гетерограницы по отношению к некоему абсолютному значению энергии — аналогу уровня вакуума. В эту энергию вносят вклад три составляющие: химическая, гидростатическая и одноосная деформации. Особым образом учитывается, что в качестве материала гетеропары используется не элементарный полупроводник, а сплав [16].

Расчеты свидетельствуют, что в бинарном твердом растворе $Si_{1-x}C_y$, выращенном на кремнии, ямы для электронов и дырок находятся в растворе, а энергия перехода падает, как -65 мэВ на процент содержания углерода (из них 46 мэВ — уменьшение деформации, 19 мэВ — химическое влияние углерода) [13]. Разрывы зон устроены таким образом, что яма для электронов глубокая, а для дырок мелкая. Дно зоны проводимости в яме твердого раствора образуют 2Δ -электроны.

Если квантовая яма для электронов в $Si_{1-x}C_y$ граничит с ямой для дырок в $Si_{1-x}Ge_x$, можно вновь рассчитывать на квазипрямую излучательную рекомбинацию электронов из $Si_{1-x}C_y$ и дырок из $Si_{1-x}Ge_x$. При этом локализацию 2Δ -электронов можно осуществить на значительно меньшем пространственном масштабе, чем в случае квантования дна зоны проводимости кремния из-за кулоновского притяжения электронов к гетерогранице, рассмотренного для случая межзонных переходов в структурах с наноструктурами.

Известно, что углерод имеет меньшую постоянную решетки, чем кремний. Тем самым, в принципе, можно скомпенсировать упругую деформацию, возникающую из-за несоответствия постоянных решеток кремния и германия и даже вовсе снять напряжение в решетке, если в сплаве $\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{C}_y$ выполняется эмпирическое соотношение $x = 8,3y$ [17].

Наконец, если вернуться к механизму спонтанного формирования наностроек, следует отметить, что благодаря участию углерода в процессе роста можно управлять размерами островков, а именно снижать их до единиц нанометров, когда существенным оказывается квантование электронного спектра по всем трем пространственным координатам. Подобные структуры в последние годы выращиваются с самым разнообразным дизайном и активно исследуются [18].

5. Заключение

В представленных выше теоретических и экспериментальных результатах продемонстрированы новые возможности использования самоорганизующихся наностроек GeSi и гетероструктур $\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{C}_y/\text{Si}$ для повышения эффективности излучательной рекомбинации структур на основе кремния.

Авторы признательны В.Я. Алешкину, Б.А. Андрееву, Н.А. Бекину, Н.А. Востокову, И.В. Долгову, Ю.Н. Дроздову, Д.Н. Лобанову, В.В. Постникову, М.В. Степиховой, Д.О. Филатову, с которыми проведены разноплановые

исследования структур $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ и $\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{C}_y/\text{Si}$, результаты которых приведены в данной работе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 99-02-16980), программы РАН по поддержке молодых ученых, программы BRNE (проект RESC-02) и программ "Физика твердотельных наноструктур" (проект 99-2047) и "Перспективные технологии и приборы для микро- и наноэлектроники" (проект 02.04.1.1.16.Э1) Миннауки РФ.

Список литературы

1. Алешкин В Я и др. *Письма в ЖЭТФ* **67** 46 (1998)
2. Алешкин В Я и др. *Изв. РАН Сер. Физ.* **63** 301 (1999)
3. Востоков Н В и др. *ФТП* **34** 8 (2000)
4. Collins R T, Fauchet P M, Tischler M A *Phys. Today* **50** (1) 24 (1997)
5. Hirschman K D et al. *Nature* (London) **384** 338 (1996)
6. Coffa S, Franzo G, Priolo F *MRS Bulletin* **23** (4) 25 (1998)
7. Andreev A Yu et al. *J. Cryst. Growth* **201/202** 534 (1999)
8. Zhao X et al. *Appl. Phys. Lett.* **74** 120 (1999)
9. Ciril G E et al. *Semicond. Sci. Technol.* **13** 1262 (1998)
10. Abstreiter G et al. *Semicond. Sci. Technol.* **11** 1521 (1996)
11. Mo Y M et al. *Phys. Rev. Lett.* **71** 2082 (1990)
12. Ross F M, Tersoff J, Tromp R M *Phys. Rev. Lett.* **80** 984 (1998)
13. Bruner K, Eberl K, Winter W *Phys. Rev. Lett.* **76** 303 (1996)
14. Van de Walle C *Rhys. Rev. B* **39** 1871 (1989)
15. Osten H J J. *Appl. Phys.* **84** 2716 (1998)
16. Cardona M, Cristensen N E *Rhys. Rev. B* **37** 1011 (1988)
17. Eberl K et al. *Appl. Phys. Lett.* **60** 3033 (1992)
18. Schmidt O G et al. *Thin Solid Films* **336** 248 (1998)

НОВЫЕ КНИГИ ПО ФИЗИКЕ И СМЕЖНЫМ НАУКАМ

Малкович Р.Ш. Математика диффузии в полупроводниках. (СПб.: Наука, 1999) 389 с. Библ.: 158 назв. Проект РФФИ 95-02-07249.

Представлен математический анализ как общих феноменологических закономерностей атомной диффузии в твердых телах, так и специфических особенностей атомной диффузии в полупроводниках, определяемых взаимодействием ионизованных примесей и точечных дефектов с электронно-дырочной подсистемой. Книга предназначена для научных работников в области физики твердого тела и физической химии, а также для практиков в области материаловедения и технологии полупроводниковых приборов. (Санкт-Петербургская издательская фирма РАН "Наука": 199034 Санкт-Петербург, Менделеевская лин., 1).

Верхотуров О.П. Введение в вычислительную оптику. Учебное пособие. (Новосибирск: Изд-во СГГА, 1998) 273 с. Библ.: 86 назв.

Учебное пособие составлено профессором кафедры оптико-электронных приборов Сибирской государственной геодезической академии. В книге рассматриваются современные методы расчета оптических систем, включая их математические модели с градиентными средами, асферическими поверхностями, сканирующие оптические системы. Даны основные теоретические сведения из геометрической оптики. Свойства исходных компонентов оптических систем, синтез оптических систем из этих компонентов рассмотрены с привлечением современных вычислительных средств. Приведены примеры синтеза оптических

систем различного назначения и их конструктивные параметры. Учебное пособие рекомендовано Министерством общего и профессионального образования Российской Федерации для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям "Оптико-электронные приборы и системы", "Лазерная техника и лазерные технологии", "Оптические технологии и материалы" и направлению "Оптотехника". (Редакционно-издательский отдел СГГА: 630108 Новосибирск, ул. Плеханова, 10).

Лукин В.П., Форгес Б.В. Адаптивное формирование пучков и изображений в атмосфере. (Под общей ред. Г.Г. Матвиенко) (Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999) 214 с. Библ.: 217 назв. Рассмотрены актуальные вопросы теории современных атмосферных адаптивных оптических систем (АОС). В основе монографии лежат оригинальные работы авторов по решению задач фазовой компенсации турбулентного размытия изображения в телескопах, а также минимизации турбулентного и теплового уширения когерентных пучков методами фазового сопряжения программной фазовой коррекции. Особое внимание уделяется влиянию нарушения непрерывности волнового фронта на эффективность и стабильность фазовых адаптивных систем. Кроме того, исследуются эффективность применения АОС на вертикальных трассах при использовании лазерной опорной звезды в качестве бакена и проблема компенсации дрожания при работе по лазерному бакену. Книга адресована специалистам в области адаптивной оптики, формирования пучков и изображений в турбулентной атмосфере,