



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

ПРИОРИТЕТНЫЙ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ  
"ОБРАЗОВАНИЕ"



**Проект «Инновационная образовательная среда в классическом университете»**

Пилотный проект № 22 «Разработка и внедрение инновационной образовательной программы «Прикладные математика и физика»»

Физический факультет

Кафедра фотоники

**В. Г. Давыдов, Б. В. Строганов**

# **СТЕНД ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ФОТОНИКИ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ НАНОСТРУКТУР**

Учебно-методическое пособие

Санкт-Петербург  
2007 г.

- Рецензент: зав. лабораторией физики и технологии эпитаксиальных наноструктур, к.ф.м.н., В. В. Овсянкин.
- Печатается по решению методической комиссии физического факультета СПбГУ.
- Рекомендовано учебным советом физического факультета СПбГУ.

## **СТЕНД ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ФОТОНИКИ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ НАНОСТРУКТУР. — СПб., 2007**

Настоящее пособие предназначено прежде всего для студентов 4–7-го курсов, аспирантов, соискателей и других обучающихся, участвующих в учебно-научной работе ЦКП «Прикладная нанофотоника», а также прочих читателей, не имеющих специальной подготовки и опыта работы в соответствующих областях, включая студентов IV курса по специальности «Фотоника твёрдых тел». Оно снабжено пространным введением, в котором излагаются общие соображения о смысле и роли проводимых работ и исследуемых объектов в русле развития физики и технического прогресса, кратко обрисовываются соответствующие разделы физики, а также даётся возможность привыкнуть к терминологии. В пособии описаны задачи, состав и принципы функционирования элементов стенда фемтосекундной фотоники эпитаксиальных наноструктур. При составлении списка литературы (25 наименований) предпочтение отдано трудам обзорного, учебного и научно-популярного характера, хотя упомянуты и некоторые специальные издания.

# Оглавление

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>5</b>
1.1	Оптический компьютер . . . . .	5
1.1.1	Электронный компьютер . . . . .	5
1.1.2	Свет как носитель информации . . . . .	6
1.1.3	Двухуровневая система . . . . .	7
1.1.4	Уширение спектральной линии . . . . .	8
1.1.5	Классические вычисления . . . . .	11
1.1.6	Квантовые вычисления . . . . .	12
1.1.7	Требования к элементам . . . . .	13
1.2	Полупроводниковые наноструктуры . . . . .	14
1.2.1	Система GaAs/AlGaAs . . . . .	16
1.2.2	Квантовые ямы . . . . .	18
1.2.3	Молекулярно-пучковая эпитаксия . . . . .	18
1.3	Возможности и состав стенда . . . . .	19
1.3.1	Характеризация структур . . . . .	19
1.3.2	Исследование физических процессов в экситонных системах . . . . .	20
1.3.3	Апробирование алгоритмов и схем обработки информации	20
1.3.4	Подсистемы стенда . . . . .	21
<b>2</b>	<b>Подготовка света</b>	<b>22</b>
2.1	Лазеры . . . . .	22
2.1.1	Lynx . . . . .	23
2.1.2	Tsunami . . . . .	25
2.1.3	Millenia . . . . .	28
2.2	Диагностика пучка . . . . .	30
2.2.1	Пространственные параметры . . . . .	31
2.2.2	Мощность . . . . .	32
2.2.3	Спектр . . . . .	33
2.2.4	Автокорреляция . . . . .	35
2.2.5	Частота . . . . .	36
2.3	Управление свойствами света . . . . .	36
2.3.1	Светоделители . . . . .	36

2.3.2	Фильтры . . . . .	38
2.3.3	Поляризационные элементы . . . . .	40
2.3.4	Модуляторы . . . . .	42
2.3.5	Маршрутизация . . . . .	45
2.3.6	Линии задержки . . . . .	47
<b>3</b>	<b>Образец</b>	<b>50</b>
3.1	Криостат замкнутого цикла . . . . .	51
3.2	Вакуумирование . . . . .	52
3.3	Термостатирование . . . . .	54
<b>4</b>	<b>Исследование света</b>	<b>57</b>
4.1	Анализ поляризации . . . . .	57
4.2	Пространственная фильтрация . . . . .	58
4.3	Монохроматор . . . . .	60
4.4	Детектирование . . . . .	61
4.4.1	Фотодиод . . . . .	61
4.4.2	Фотоэлектронный умножитель . . . . .	63
4.4.3	ПЗС-матрица . . . . .	67
<b>5</b>	<b>Обработка сигнала и управление</b>	<b>70</b>
5.1	Контроллер ПЗС-матрицы . . . . .	70
5.2	Синхронный детектор . . . . .	71
5.3	Управление шаговыми двигателями . . . . .	74

# Глава 1

## Введение

### 1.1 Оптический компьютер

#### 1.1.1 Электронный компьютер

Понятие «информатика» подразумевает три основных способа обращения с информацией: её передачу, хранение и переработку. Традиционно все эти три задачи решаются электронными средствами: информация хранится в виде электрических зарядов (по крайней мере, пока речь идёт об оперативной памяти с возможностью быстрого произвольного доступа), передаётся по проводам в виде импульсов электрического тока и обрабатывается логическими элементами на полупроводниковых транзисторах.

Однако повышение производительности этих методов сталкивается с фундаментальными ограничениями. Дело в том, что вышеуказанные процессы в принципе необратимы, то есть обязательно приводят к *уничтожению* информации. Так, для того, чтобы запомнить нужную информацию в ячейке памяти, необходимо стереть её предыдущее содержимое; при передаче информации по кабелю возбуждённый источником импульс должен быть поглощён на стороне приёмника во избежание интерференции следующих посылок с отражённой волной предыдущих; элементарные логические элементы (например, И-НЕ) из двух бит входной информации делают один бит выходной и т.д. Согласно второму закону термодинамики, уничтожение информации эквивалентно возрастанию энтропии. А возрастание энтропии  $dS$  в электронных устройствах сопровождается релаксацией носителей заряда, что приводит к выделению тепла

$$dQ = TdS, \quad (1.1)$$

где  $T$  — абсолютная температура устройства (точнее, того термостата, за счёт взаимодействия с которым обеспечивается релаксация носителей; чаще всего эту роль выполняют фононы, то есть тепловые колебания атомов, из которых составлено устройство). Более подробно соответствующие термодинамические соображения и вытекающие из них фундаментальные ограничения

рассмотрены в классической работе Р. Фейнмана[1].

На практике указанные ограничения, разумеется, не достигаются, однако именно они служат корнями серьёзных проблем, стоящих на пути повышения производительности электронных вычислителей. Наиболее известны две из них, так называемые проблема перегрева и проблема межсоединений. Причём масштабированием элементов, даже если абстрагироваться от технологических сложностей изготовления, обе эти проблемы одновременно не решить: при увеличении размеров растут задержки в межсоединениях, а при уменьшении — растут трудности с теплоотводом (ещё одна сторона проблемы межсоединений, топологическая, от масштабирования практически не зависит).

### 1.1.2 Свет как носитель информации

Вот почему много внимания уделяется поиску других носителей информации. Естественной альтернативой электрону является фотон. Хорошо развиты разнообразные, в том числе и весьма изощрённые, способы управления и использования света[2]. Замечательной особенностью света, распространяющегося в свободном пространстве, является совершенная линейность уравнений Максвелла, которым подчиняется его поведение. Эта особенность (отсутствие взаимодействия между фотонами) позволяет при помощи простых средств, вроде участков свободного пространства между полированными поверхностями зеркал и линз, производить весьма сложные линейные вычисления: проекцию, аффинные деформации двумерных массивов данных, преобразование Фурье и связанную с ним фильтрацию пространственных частот и так далее, не сталкиваясь с топологическими и другими проблемами взаимодействующих частиц.

Следует обратить внимание на параллелизм, органически присущий такого рода вычислениям. Фактически, размер элементарного независимого вычислительного элемента  $d$  в двумерном массиве, традиционно называемом кадром, определяется длиной волны  $\lambda$  и числовой апертурой  $N$  оптической системы

$$d \approx \frac{\lambda}{N}. \quad (1.2)$$

Кроме того, принцип Ферма гарантирует одновременность вычислений по всей площади кадра, устраняя проблемы масштабирования, связанные с задержками распространения сигнала, перекосом тактовых последовательностей и т. п.

Ещё одно практически важное свойство света, а точнее, света из традиционно используемых видимого и ближнего инфракрасного диапазонов, заключается в очень высокой частоте электромагнитных колебаний. Это приводит к тому, что широкая в абсолютных единицах измерения полоса, к примеру, 30 ГГц, в относительных величинах будет весьма мала (0.01% при длине вол-

ны  $1 \mu\text{м}$ ) что позволяет передавать в единицу времени большие количества данных, не подвергая их целостность разрушительному влиянию дисперсии, спектральной неоднородности затухания и других частотных искажений среды передачи. Собственно, только лишь благодаря этому свойству к настоящему моменту оптика в известной мере вытеснила электронику с рынка передачи больших объёмов информации на сколь-нибудь значительные расстояния.

### 1.1.3 Двухуровневая система

Однако, линейные процессы, о которых шла речь до сих пор, позволяют решать лишь ограниченный круг задач, пусть и важных с практической точки зрения. Универсальный же вычислитель должен быть нелинейным, по крайней мере, по отношению к входным/выходным данным. Нелинейные оптические процессы происходят при взаимодействии света с веществом. При этом в зависимости от особенностей вещества, интенсивности света и природы взаимодействия величина и характер нелинейности могут существенно различаться[3].

Наиболее сильное взаимодействие света с веществом наблюдается в условиях резонанса, то есть когда энергия фотона с частотой  $\omega$  совпадает с разностью между какими-нибудь двумя энергетическими уровнями  $E_0$  и  $E_1$  квантовых частиц в среде:

$$\hbar\omega = E_1 - E_0. \quad (1.3)$$

Вообще говоря, двух уровней вполне достаточно для проявления всевозможных полезных нелинейных эффектов. Более того, дополнительные уровни могут мешать, как создавая трудности при описании происходящих процессов и/или анализе наблюдаемых явлений, так и влияя непосредственно на нелинейность. Так, гармонический осциллятор, имеющий бесконечный набор равноотстоящих энергетических уровней, проявляет резонансные свойства, но при этом его отклик на воздействие света совершенно линеен.

Более того, ансамбль независимых двухуровневых частиц в резонансном световом поле имеет простое и изящное описание на языке формализма матрицы плотности, особенно в полуклассическом приближении, то есть когда свет рассматривается как непрерывное поле, а квантование связано исключительно с частицами среды. Это описание исторически было разработано применительно к магнитному резонансу, где в силу низких частот (энергий квантов) переходов квазиклассический подход вполне очевиден и естествен, а магнитные моменты частиц со спином  $\frac{1}{2}$  (электронов, протонов) в достаточно сильном внешнем постоянном однородном магнитном поле образуют практически идеальный ансамбль двухуровневых систем.

Резонансная система, в частности, двухуровневая, характеризуется несколькими параметрами, которые удобно формулировать на спектральном

языке. Прежде всего это, конечно же, резонансная частота. С точки зрения приложений весьма удобно, чтобы эту частоту можно было менять в известных пределах посредством должного выбора и/или подготовки системы. В противном случае, как показывает опыт развития неодимовых лазеров, основные перспективы сужаются лишь до отдельных специальных применений, где свободой выбора резонансной частоты жертвуют ради тех или иных уникальных характеристик.

### 1.1.4 Уширение спектральной линии

Следующая группа параметров связана с уширением спектральной линии. Они суть (в порядке возрастания для типичных систем, традиционно исследуемых спектроскопией) *радиационная* ширина, *однородная* ширина и *неоднородная* ширина.

#### Радиационная (естественная) ширина

Первая характеризует собственно квантовый переход между интересующими уровнями и определяется (при заданной частоте) исключительно матричным элементом дипольного момента перехода  $\langle 0 | \hat{d} | 1 \rangle$  (для дипольно-разрешённых переходов), коэффициентом Эйнштейна  $A_{10}$  для спонтанных переходов или  $B_{10}$ ,  $B_{01}$  для вынужденных, или силой осциллятора (можно использовать любую из этих величин, поскольку все они пропорциональны друг другу). Своё название радиационная ширина получила потому, что она совпадает со скоростью спонтанного излучательного распада ансамбля систем, исходно находящегося в полностью возбуждённом состоянии  $|1\rangle$ , в предположении, что система не подвержена никаким другим взаимодействиям. Иными словами, радиационная ширина характеризует величину взаимодействия квантовой системы со светом.

Помимо излучательных переходов, в сложных системах (например, молекулярных или твёрдотельных) наблюдается также и безызлучательный распад оптически возбуждённых состояний. Он приводит к сокращению времени жизни  $T_1$  системы в состоянии  $|1\rangle$  по сравнению с радиационным временем. Поскольку этот процесс определяется наличием дополнительных уровней и/или взаимодействий, он неизбежно приводит к выпадению системы из резонанса, и, следовательно, нежелателен с точки зрения построения оптического вычислителя. В дальнейшем, если не оговорено особо, считается, что вероятность безызлучательных переходов мала.

Излучательная ширина спектральной линии

$$\Gamma_1 = \frac{1}{T_1}, \quad (1.4)$$

наряду с фундаментальной ролью меры взаимодействия системы со светом,



имеет также и весьма серьёзное практическое значение применительно к задаче реализации оптического вычислителя, а именно, она накладывает физическое ограничение на максимальную тактовую частоту его работы. Действительно, для начала следующего такта вычислений необходимо привести систему в исходное состояние, а  $T_1$  — самое длинное из характерных времён. Именно спонтанный излучательный распад является в оптическом компьютере тем самым необратимым процессом, о котором шла речь в параграфе 1.1.1. На языке магнитного резонанса время  $T_1$  называется временем *продольной* релаксации.

Особо необходимо отметить тот факт, что выделение избыточной энтропии в указанном необратимом процессе происходит не в виде тепла, а в виде резонансного излучения спонтанной люминесценции. Это излучение, с одной стороны, достаточно некогерентно, чтобы справиться с задачей отвода энтропии, а с другой стороны, всё ещё достаточно организовано, чтобы самостоятельно покинуть окрестности вычислительного элемента со скоростью света. Таким образом, проблема теплоотвода в принципе решается или, по крайней мере, может быть перенесена в другую часть устройства (с другими масштабными характеристиками).

## Однородное уширение

Следующий вид уширения спектральной линии, а именно, однородное уширение, имеет причиной не только оптические свойства системы, но и её взаимодействие с ближайшим окружением. В отличие от безызлучательной релаксации, которую можно рассматривать как неупругую разновидность такого взаимодействия, однородное уширение не сопровождается необратимыми потерями энергии, тем самым его следует считать проявлением упругого взаимодействия (рассеяния). В различных системах природа последнего может различаться, так, в атомарных пара́х это, как правило, столкновение возбуждённых атомов с другими частицами в газе, в твёрдом теле — электрон-фонное взаимодействие, то есть рассеяние на тепловых колебаниях составляющих твёрдое тело атомов и т.д., однако физическая сущность однородного уширения всегда состоит в случайной модуляции *фазы* квантовомеханического состояния системы.

Заметим, что в двухуровневой системе, где существует всего одна фазовая степень свободы (относительная фаза двух базисных волновых функций; их общая фаза есть произвольный параметр квантовомеханического описания и не имеет физического, то есть наблюдаемого смысла), она простым и однозначным образом связана с частотой перехода (1.3): фаза есть интеграл от частоты по времени. Иными словами, фазовая модуляция эквивалентна частотной, то есть быстрому относительному сдвигу энергий уровней  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$ , что порою упрощает формальный вид оператора взаимодействия, ответственного за однородное уширение.

Фазовая модуляция внешним случайным воздействием также приводит к необратимой потере информации, заключённой в когерентности квантовомеханического состояния системы, то есть однородное уширение связано с фазовой релаксацией. На языке магнитной спектроскопии она называется «поперечной релаксацией», а соответствующее время обычно обозначается  $T_2$ . Что касается конструирования оптического вычислителя, величина  $T_2$  также ограничивает частотные параметры элементов, однако *снизу*, а не сверху. Действительно, длительность элементарного акта обработки информации должна быть меньше, чем  $T_2$ , во избежание потери информации, заключённой в фазовой степени свободы.

## Неоднородное уширение

Если же сдвиг энергий уровней частиц системы происходит достаточно медленно (по сравнению со временем  $T_1$ ), то отдельные частицы ансамбля приобретают различную индивидуальность, и это называется *неоднородным* уширением. Подчеркнём ещё раз, что, в отличие от радиационной и однородной ширины, неоднородное уширение есть свойство *ансамбля*, а не одиночной частицы<sup>1</sup>. Соответствующее время, то есть время потери взаимной когерентности между различными частицами ансамбля за счёт разброса частот переходов, называется временем *обратимой* фазовой релаксации и обозначается  $T_2^*$ . Обратимость здесь подразумевается в том смысле, что при помощи специальной методики, например, оптического эха (см. ниже, параграф 1.1.5), можно извлечь фазовую информацию, запомненную частицами ансамбля, даже если с момента её запоминания прошло время, большее  $T_2^*$ , но, разумеется, меньшее  $T_2$ .

Поскольку сущность неоднородного уширения сходна с сущностью однородного уширения, их причины также имеют много общего. В газовых средах основная причина неоднородного уширения — доплеровское смещение частоты перехода молекулы (атома) при её тепловом движении вдоль луча света<sup>2</sup>, а в твёрдом теле — неоднородное уширение, как правило, связано с пространственной неоднородностью структуры, распределения дефектов и/или примесей и т. п., когда каждая частица находится в несколько ином локальном окружении, нежели другие.

---

<sup>1</sup>Серия повторяющихся экспериментов над одиночной физической частицей тоже считается ансамблем. Есть так называемая *эргодическая теорема*, устанавливающая условия эквивалентности такого ансамбля традиционному (однократный эксперимент на множестве независимых частиц).

<sup>2</sup>Иными словами, частота перехода зависит от направления наблюдения — яркая иллюстрация того, что говорить о физических процессах в системе корректно лишь при указании конкретных условий эксперимента.

### 1.1.5 Классические вычисления

Динамика двухуровневых систем в резонансном поле, описываемая уравнениями Блоха для матрицы плотности (вкратце изложенными, например, И. Герловиным [4]), позволяет производить различные операции, которым можно придать логический смысл. Например, осветив систему, первоначально находящуюся в состоянии  $|0\rangle$ , световым импульсом площадью  $\pi$  (площадью импульса называется интеграл

$$\int \frac{\vec{d} \cdot \vec{E}}{\hbar} dt, \quad (1.5)$$

где  $d$  — дипольный момент перехода, а  $E$  — мгновенное значение электрического поля световой волны, причём обе эти величины колеблются с высокой частотой, так что интеграл отличен от нуля только в резонансном случае, то есть когда частоты этих колебаний равны), можно получить инвертированную (то есть в состоянии  $|1\rangle$ ) систему, которая при освещении вторым, считывающим  $\pi$ -импульсом, излучит свет в том же направлении, да ещё и усиленный (к энергии считывающего импульса добавится запасённая в системе энергия). Этот эффект можно рассматривать как операцию «логическое И», поскольку при отсутствии любого из двух импульсов система вообще не излучает когерентного света.

В другой разновидности вышеприведённой схемы используется *двумерный* ансамбль двухуровневых систем, то есть плоский слой, толщина которого пренебрежимо мала по сравнению с длиной волны нерезонансного света в соответствующей среде [5]. Вообще говоря, такой слой должен быть полностью прозрачным, а отклонения от прозрачности, то есть поглощение и/или отражение света, всецело связаны с резонансным взаимодействием.

При попадании на такой слой, переведённый в состояние инверсии, считывающего импульса, площадь которого много меньше  $\pi$ , вся энергия, запасённая в слое, высвечивается в обе стороны от слоя, а если слой исходно находился в основном состоянии, то резонансный считывающий импульс лишь зеркально отражается, не проходя насквозь. Разумеется, фаза отражённого (излучённого) света, в том числе и пространственное распределение этой фазы, определяется фазой считывающего импульса, то есть возможность обработки изображений и/или голограмм присутствует и в нелинейном случае.

Ещё один процесс, применимый для нелинейных вычислений — это четырёхволновое смешение, когда импульсы, представляющие два (или более) операнда, действуют одновременно (в пределах времени  $T_2$ ). При этом фаза продуктов преобразования  $\varphi$  зависит от фаз операндов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  следующим образом:

$$\varphi = \pm\varphi_i \pm \varphi_j \pm \varphi_k, \quad (1.6)$$

где  $i$ ,  $j$  и  $k$  независимо принимают значения 1 или 2. Резонансными являются продукты, для которых в формуле (1.6) плюсов на единицу больше,

чем минусов; в частности, наиболее интересен с практической точки зрения случай

$$\varphi = 2\varphi_2 - \varphi_1, \quad (1.7)$$

так как фаза этого продукта, вообще говоря, не равна фазе никакого из исходных операндов. Поскольку волновой вектор  $\vec{k}$  есть ни что иное, как распределение фазы  $\varphi$  в пространстве

$$\vec{k} = \nabla\varphi,$$

постольку для плоских волн из уравнения (1.7) следует

$$\vec{k} = 2\vec{k}_2 - \vec{k}_1, \quad (1.8)$$

что проиллюстрировано рис. 1.1. Другими словами, волна — продукт взаимодействия распространяется, вообще говоря, в ином направлении по отношению к возбуждающим волнам (хотя все три волновых вектора и лежат в одной плоскости) и может быть легко отделена от последних при помощи соответствующих пространственных фильтров (диафрагм).

Соотношение (1.8) справедливо и в случае *оптического эха* в неоднородно уширенном ансамбле, когда длительность возбуждающих импульсов меньше, чем  $T_2^*$ , а временная задержка между ними больше, чем  $T_2^*$ , но меньше, чем  $T_2$ . При этом задержка по времени между первым и вторым импульсом трансформируется в распределение фаз в неоднородно уширенном ансамбле, которое при выполнении известных условий может быть преобразовано обратно во временную задержку, только уже на этот раз между вторым возбуждающим импульсом и нелинейным продуктом, испускаемым средой. Таким образом, оптическое эхо в неоднородно уширенном ансамбле эффективно добавляет оптическому вычислителю дополнительную степень свободы — время, причём время направленное (первый и второй импульсы воздействуют на среду, находящуюся в существенно разных состояниях). Для описания и расчёта этого явления разработан довольно мощный и изящный формализм[6].

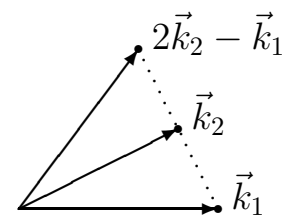


Рис. 1.1: Невырожденная геометрия четырёхволнового смешения для плоских волн.

### 1.1.6 Квантовые вычисления

При последовательном квантовомеханическом рассмотрении ансамбля следует учитывать не только внутреннюю когерентность каждой двухуровневой частицы, но ещё и *взаимную* когерентность между различными частицами ансамбля. Таким образом появляется огромное число дополнительных степеней свободы (быстро растущее с увеличением размеров ансамбля), которые, в

принципе, можно использовать для обработки дополнительной информации. Подробное описание известных алгоритмов работы квантовых компьютеров здесь вряд ли уместно, однако следует отметить, что большинство из них[7] как раз и использует такие «комбинационные» степени свободы для представления однородных массивов сложных данных корреляционной<sup>3</sup> природы.

Однако в рассматриваемой конструкции — двумерном слое двухуровневых частиц, освещаемых резонансными световыми лучами — взаимная когерентность различных частиц тривиальна, ибо полностью определяется распределением фаз возбуждающего света (наряду с распределением собственных частот (1.3) частиц, если есть заметное неоднородное уширение). Таким образом, полное квантовомеханическое рассмотрение данного случая представляется нам неоправданным усложнением, поскольку не несёт дополнительного смысла и не сулит дополнительных выгод по сравнению с квазиклассическим рассмотрением ансамбля независимых двухуровневых квантовых частиц в классическом поле световых волн.

### 1.1.7 Требования к элементам

Итак, мы выяснили общую структуру и фундаментальные принципы работы вычислительного элемента оптического компьютера. Рассмотрим теперь конкретные численные параметры этой схемы. Один из параметров — тактовая частота, как было сказано в параграфе 1.1.4 на странице 9, ограничивается радиационной шириной (1.4). Для практической применимости (если угодно, конкурентоспособности) в сколь-нибудь широкой области, по-видимому, обязательным требованием является значение тактовой частоты на уровне порядка нынешнего предела тактовой частоты электронных компьютеров, то есть единиц гигагерц. Учитывая (1.4), получаем требование

$$T_1 \lesssim 10^{-9} \text{ с.} \quad (1.9)$$

Требование достаточного быстродействия сразу отсеивает столь привлекательные по остальным параметрам системы, как спины в магнитном поле[7], редкоземельные ионы в прозрачных матрицах[8] и т. п. хорошо исследованные ансамбли практически двухуровневых систем.

Следующий параметр — это энергопотребление. Полная мощность, потребляемая (и в конце концов рассеиваемая) компьютером, зависит от скорости и объёма производимых вычислений, поэтому принято рассматривать удельную мощность, то есть расход энергии на единичную вычислительную операцию. Эта величина пропорциональна (пространственной) площади единичного вычислительного элемента, а также мощности и длительности светового импульса.

---

<sup>3</sup>В математике и информатике для обозначения аналогичных сущностей употребляется похожий термин «реляционный».

Выражение, включающее длительность импульса, нам уже встречалось — это (фазовая) площадь импульса (1.5), которая для успешных вычислений по заданному алгоритму должна иметь вполне определённое значение порядка  $\pi$ . Отметим, что площадь пропорциональна *амплитуде* импульса, а мощность — *квадрату* амплитуды. Получается, что мощность и энергию импульса можно в известных пределах регулировать, меняя длительность при сохранении необходимой площади. В частности, для уменьшения энергии импульса его длительность следует увеличивать.

Пределом увеличения длительности импульса служит время потери когерентности  $T_2$ . Таким образом, желание минимизации энергопотребления приводит к требованию минимизации скорости необратимой поперечной релаксации:

$$T_2 \gtrsim T_1. \quad (1.10)$$

Величина  $T_1$  появилась в неравенстве (1.10) из-за того, что спонтанная люминесценция (взаимодействие с вакуумными флуктуациями электромагнитного поля) также сопровождается дефазировкой, то есть излучательная скорость задаёт фундаментальный предел; в частности, для двухуровневой системы с дипольно-разрешённым переходом  $T_2^{\max} = 2T_1$ .

С физической точки зрения соотношение (1.10) означает, что наилучшие системы для обработки оптической информации должны взаимодействовать со светом сильнее, чем со всеми остальными окружающими факторами, за счёт достаточно большого дипольного момента перехода.

Что касается пространственной площади вычислительного элемента, то, хоть она и ограничена выражением (1.2), имеется свобода манипулировать количеством двухуровневых частиц на этой площади. Кроме того, даже если физическое количество частиц в пределах площадки (1.2) определяется конструктивными причинами, остаётся возможность регулировать их число в пределах однородного спектрального пакета за счёт неоднородного уширения.

В общем, оценки[9] показывают, что нет фундаментальных препятствий к достижению расхода энергии на элементарную операцию, составляющего всего лишь несколько<sup>4</sup> резонансных фотонов (1.3). Интересно, что даже при столь малых энергиях импульса квазиклассическое рассмотрение даёт вполне адекватные результаты, практически совпадающие с результатами полностью квантового описания в тех случаях, в которых последние поддаются вычислению.

## 1.2 Полупроводниковые наноструктуры

Итак, требуется найти физическую систему, которая бы сильно взаимодействовала с резонансным светом, да вдобавок была бы достаточно нелинейной,

---

<sup>4</sup>Порядка  $(2\pi/N)^2$ , где  $N$  — числовая апертура.

например, состояла из двухуровневых частиц. Атомарные системы, наиболее полно исследованные как теоретически, так и экспериментально, не подходят по одной простой причине: в силу малых размеров атомов, даже самые оптически активные (щелочные металлы) имеют времена  $T_1 \gtrsim 10^{-6}$  с.

Молекулярные системы, сильно взаимодействующие со светом, называются «красителями» [11] и обладают рядом весьма привлекательных свойств, например, возможностью изменять рабочую длину волны в широких пределах за счёт химической модификации молекул, а также способностью объединяться в регулярные сверхструктуры, в частности, *J-агрегаты* [12], создавая тем самым системы с коллективными квантовыми состояниями, дипольный момент переходов между которыми может быть многократно больше дипольного момента одной изолированной молекулы, из которых составлен агрегат<sup>5</sup>. В принципе, J-агрегаты обладают достаточной нелинейностью и могут иметь хороший квантовый выход<sup>6</sup>, то есть способны производить оптические вычисления, однако в силу особенностей формирования (под действием Ван-дер-Ваальсовых сил в растворах, как правило, при низких температурах) агрегаты оказываются недостаточно стойкими, в частности, безызлучательный распад возбуждённого состояния с заметной вероятностью сопровождается изменением структуры агрегата вплоть до его распада. Проще говоря, сложные молекулярные системы при длительной работе выцветают.

Следующий шаг в сторону усложнения закономерно приводит нас к твёрдым системам. В твёрдом теле атомные энергетические уровни и молекулярные энергетические термы сливаются в непрерывные энергетические зоны. Казалось бы, о каких двухуровневых частицах может идти речь? Выручает вторичное квантование: неоднородности в твёрдом теле во многих отношениях ведут себя подобно малым частицам, они так и называются «квазичастицами», в частности, могут иметь отдельные энергетические уровни, переходы между которыми легко наблюдать, если соответствующая энергия уместается в области прозрачности (запрещённой зоне) твёрдого тела.

Наиболее удобны для исследования и использования два типа неоднородностей, *центры окраски* (примеси, дефекты кристаллической структуры и т. д.) и *экситоны* — атомоподобные связанные состояния из *электрона* и *дырки* [13]. Подчеркнём, что электроны и дырки в полупроводниках — это *квазичастицы*, эффективная масса которых  $m^*$  (определяемая из соотношения энергии  $E$  и импульса  $k$ ):

$$\frac{k^2}{2E} = \frac{(m^*v)^2}{2m^*v^2} = m^*, \quad (1.11)$$

---

<sup>5</sup>Любопытно, что J-агрегаты были открыты весьма давно, в первой трети XX века, и с тех пор с успехом использовались в отдельных областях оптической обработки информации, например, для сенсбилизации инфракрасных галогенид-серебряных фотоматериалов.

<sup>6</sup>Отношение радиационной скорости к  $T_1$ .

где  $v$  — формальный параметр, имеющий размерность скорости) вовсе не совпадает с массой свободной частицы; она зависит от направления вектора импульса относительно кристаллографических осей, и может иметь даже отрицательное значение.

*Прямозонными* называются полупроводники, в которых минимальная энергия как дырки, так и электрона достигается при нулевом импульсе. В таких полупроводниках энергия экситона меньше минимальной суммарной энергии электрона и дырки на энергию связи экситона, поэтому при достаточно низких температурах распад экситона возможен только через рекомбинацию (аннигиляцию) электрона и дырки. При этом энергия кванта света, испущенного в результате излучательной рекомбинации, оказывается в пределах запрещённой зоны, и свет может легко покинуть образец. Фактически, единственным каналом поглощения таких фотонов является образование экситонов.

В протяжённом кристалле экситоны не образуют дискретных энергетических уровней, поскольку, наряду с энергией собственно электрона и дырки, а также энергией связи экситона, имеется также энергия, определяемая движением экситона как целого. Поскольку экситон можно рассматривать как массивную частицу, его движение в кристалле полупроводника обладает импульсом и энергией, причём энергия может принимать непрерывный ряд значений, а импульс — существенно превосходить импульс фотона<sup>7</sup>, а уповать на законы сохранения энергии и импульса при этом движении возможно лишь в той мере, в которой кристалл свободен от прочих квазичастиц, на которых рассеивается экситон: дефектов кристаллической структуры, примесей, тепловых фононов, свободных электронов и дырок, а также других экситонов.

В то же время экситоны обладают настолько привлекательными свойствами, прежде всего большим (в некоторых прямозонных полупроводниках) дипольным моментом перехода, что оправданы усилия, направленные на ограничение движения экситона в полупроводнике путём искусственного создания препятствий этому движению, приводящих к дискретизации энергетического спектра экситонов. Такая методика сейчас называется *наноструктурированием* полупроводника и входит в большую моду, хотя полупроводниковые устройства с наноразмерными деталями, использующие квантовые эффекты, успешно применяются вот уже скоро полвека (например, туннельные диоды).

### 1.2.1 Система GaAs/AlGaAs

Первые полупроводниковые устройства изготавливались из монокристалла какого-нибудь одного полупроводника, например, кремния, свойства которого регулировались при помощи *легирования*, что позволяло использовать

---

<sup>7</sup>Такие экситоны «тёмные», то есть плохо взаимодействуют со светом и с точки зрения оптического вычислителя лишь бесполезно уносят энергию.



широкий спектр технологий изготовления, от жидкостной эпитаксии до ядерной трансмутации, однако быстро выяснились принципиальные ограничения такого подхода, главным образом, невозможности независимо регулировать ширину запрещённой зоны различных частей устройства.

Чтобы обойти эти ограничения, используются *гетероструктуры* [14], то есть единая конструкция, состоящая из частей различного химического состава (как правило, разных полупроводников; структуры типа металл-полупроводник или изолятор-полупроводник обычно имеют свои собственные названия, хотя по сути являются теми же гетероструктурами). Среди полупроводников, применяемых для изготовления гетероструктур, наиболее популярны бинарные системы — кристаллические соединения элементов II и VI или III и V групп Периодической системы элементов. Иногда элементы называют явно, говоря о ZnCdMg–SSeTe и AlGaIn–NPAAs системах. При этом в одной системе может быть более одного элемента из той или иной группы; общность химических свойств и кристаллической решётки, как правило, позволяет использовать различные соотношения между элементами. За счёт достигаемого таким путём разнообразия химического состава можно, вообще говоря, независимо менять параметры кристалла полупроводника, такие как ширину запрещённой зоны и период (*постоянную*) кристаллической решётки (играющий важнейшую роль в конструировании гетероструктур; так, хорошее соответствие постоянных решётки различных составов позволяет делать из них монокристаллические приборы, а контролируемое различие постоянных решётки при известных условиях приводит к *самоорганизации*, то есть спонтанному формированию трёхмерных структур нанометровых масштабов).

Особого внимания заслуживает система



при достаточно малых  $x$ , не превышающих 30–40%. Во-первых, такие составы являются прямозонными полупроводниками, что позволяет применять их в оптических вычислительных элементах, во-вторых, постоянная решётки таких систем очень слабо зависит от  $x$ , что позволяет свободно экспериментировать в широком диапазоне составов и размеров, не опасаясь спонтанного нарушения кристаллической структуры, в-третьих, такие системы достаточно устойчивы в атмосфере при комнатной температуре, чтобы с ними было удобно работать, и в-четвёртых, ширина запрещённой зоны соответствует фотонам ближней инфракрасной и красной области спектра, имеющей весьма богатое оснащение различными приборами и инструментами (кремниевые фотоприёмники, титан-сапфировые и полупроводниковые лазеры и т.д.).

## 1.2.2 Квантовые ямы

Одной из простейших гетероструктур, наряду с одиночной гетерограницей и дельта-слоем, является *квантовая яма* — слой узкозонного полупроводника, заключённый между *барьерами* — слоями более широкозонного полупроводника, изолятора или вакуума. В таком слое наблюдается *одномерное* ограничение движения экситона в направлении нормали к слою, приводящее (в достаточно тонком и/или однородном слое) к проявлению квантовых эффектов, которые можно наблюдать экспериментально[15]. Название «яма» используется по аналогии с хрестоматийной задачей об одномерном движении квантовой частицы в прямоугольной потенциальной яме[16], хотя в полупроводниковом слое движение экситонов трёхмерное, в частности, весьма слабо ограниченное в плоскости слоя.

Обычно, если нет особых требований к резонансной энергии экситонов, в качестве материала ямы применяется чистый арсенид галлия, как наиболее технологически освоенный состав семейства (1.12), а в качестве барьеров с обеих сторон — раствор (1.12) с  $x \approx 30\%$ , или *сверхрешётка* — чередующиеся очень тонкие (много тоньше характерных размеров экситона) слои чистого арсенида галлия и раствора с бóльшим содержанием алюминия, в зависимости от особенностей технологии выращивания. Таким образом яма защищается и от воздействия внешней среды, то есть внешний барьер может выполнять роль защитного слоя.

Следует отметить, что энергия экситона в квантовой яме всегда выше энергии свободного экситона в кристалле того же полупроводника. Это доставляет известные неудобства, поскольку вся гетероструктура выращивается на подложке из арсенида галлия, то есть свет, резонансный экситону в яме, подложкой поглощается, препятствуя исследованию образцов в геометрии «на просвет». С другой стороны, полное и нерезонансное поглощение света, идущего насквозь, сильно облегчает интерпретацию результатов исследования отражённого (и рассеянного назад) света.

Также можно упомянуть о том, что дипольный момент экситонного перехода в квантовой яме несколько увеличивается по сравнению со свободным экситоном в кристалле.

## 1.2.3 Молекулярно-пучковая эпитаксия

Для изготовления полупроводниковых гетероструктур обычно применяются методы послойного эпитаксиального выращивания на хорошо отполированной поверхности монокристаллической подложки (возможно, в сочетании с литографией/травлением для получения сложных конфигураций в плоскости структуры). Существует целая иерархия эпитаксиальных методов, которые можно условно упорядочить по скорости роста: жидкостная эпитаксия (когда выращиваемое вещество берётся из раствора и/или расплава)

позволяет за смену вырастить слой толщиной многие миллиметры, семейство газофазных химических методов (MOVPE, MOCVD и т.д.), характеризующееся типичными толщинами структур в доли миллиметра и, наконец, молекулярно-пучковая эпитаксия (MBE — molecular beam epitaxy), самый медленный и поэтому самый «аккуратный» метод, при котором образец находится в хорошем вакууме, количество напыляемого вещества контролируется с субмонослойной точностью, а вакуум-совместимые аналитические методы (дифракция электронов на растущей поверхности, масс-спектрометрический анализ газового состава остаточной атмосферы и др.) позволяют в реальном времени наблюдать и до известной степени контролировать процесс роста. Однако все эпитаксиальные методы в значительной мере полагаются на химические силы, которые в конце концов и выстраивают атомы в кристаллическую решётку структуры, и сильно зависят от динамики и термодинамики роста. В общем, эпитаксиальный рост — сложная технология[10], и разработанность этой технологии для системы (1.12) сыграла при выборе последней не меньшую роль, нежели физические свойства собственно полупроводника.

## 1.3 Возможности и состав стенда

Для исследования полупроводниковых гетероструктур, создаваемых с целью реализации элементов оптических вычислительных машин, построен универсальный стенд, позволяющий использовать различные оптические методики и при необходимости относительно легко воплощать новые. Он предназначен для решения различных задач:

### 1.3.1 Характеризация структур

Под словом *характеризация* понимается нахождение и измерение уникальных свойств каждого образца, которые, с одной стороны, были бы связаны с его пригодностью для намеченных целей, а с другой — не требовали бы для количественного измерения сложных и/или плоховоспроизводимых методик. В подавляющем большинстве исследований принято в качестве стандартного свойства, характеризующего структуру, использовать спектр и кинетику экситонной люминесценции, возбуждаемой коротковолновым светом, например, аргонового лазера. Разумеется, стенд укомплектован аппаратурой, позволяющей их измерять.

Однако, явление люминесценции сопровождается множеством физических процессов[11], не связанных напрямую с интересующими характеристиками, но усложняющих и/или затрудняющих интерпретацию результатов. Поэтому на стенд возложена задача *резонансных* измерений спектрального распределения таких параметров, как зеркального отражения, рассеяния света, поглощения (в некоторых случаях) и т. д., причём возможно фиксировать

распределение этих величин не только по спектру, но и по поверхности образца. Последнее позволяет анализировать причины той части неоднородного уширения, которая имеет крупномасштабные (макроскопические) пространственные корреляции.

### 1.3.2 Исследование физических процессов в экситонных системах

Основной объём работ, производимых на стенде, заключается в исследовании физических процессов, происходящих при взаимодействии света с полупроводниковой гетероструктурой, поскольку элементарная модель, описывающая поведение идеального ансамбля двухуровневых систем, заведомо неприменима к экситонам в квантовой яме, так, например, она вовсе не учитывает движения экситонов, наличие даже в одном экситоне множества квантовых уровней и др. В то же время, эти неучтённые процессы вполне в состоянии влиять на рабочие характеристики устройства, двигая рабочие уровни, сбивая когерентность и т. п.

Для этих исследований приходится использовать (и изобретать!) разнообразные методики, позволяющие по возможности разделить проявления этих процессов и собрать разностороннюю информацию. Основное внимание уделяется методикам, дающим хорошее временное разрешение, сравнимое со временем фазовой релаксации, которые вдобавок к тому же дают информацию, связанную с *фазой* когерентных процессов. Примеры таких методик будут рассмотрены ниже, при обсуждении способов подготовки и детектирования света.

### 1.3.3 Апробирование алгоритмов и схем обработки информации

Наконец, наличие возможности подготовки и измерения резонансного света в подходящем диапазоне параметров позволяет производить испытание макета (прототипа) оптического логического элемента в натуральных условиях, то есть непосредственно измерять его *рабочие* характеристики, подбирать оптимальные режимы и способы использования и т. д.

Наличие нескольких различных каналов распространения света со своими собственными независимыми средствами регулирования его характеристик позволяет воплощать и исследовать довольно замысловатые алгоритмы управления оптическим вентилем.

### 1.3.4 Подсистемы стенда

Стенд, выполняющий вышеперечисленные задачи, можно условно подразделить на несколько подсистем. Удобно рассматривать их по направлению распространения света (а также по направлению традиционных рассуждений квантовомеханического или оптического эксперимента). Это подсистема *приготовления света* в требуемом данным экспериментом состоянии, *образец* в контролируемом окружении и система *детектирования и анализа* света от образца. Разумеется, эти системы взаимосвязаны между собой, так что разделение именно условное.

# Глава 2

## Подготовка света

Подсистема подготовки света служит для создания светового поля в известном и воспроизводимом состоянии и включает в себя источники света, средства контроля и диагностики, а также многочисленные элементы, по возможности независимо управляющие различными характеристиками имеющегося светового поля.

### 2.1 Лазеры

В качестве источников света чаще всего применяются лазеры[17]. Поскольку резонансные частоты исследуемых систем не имеют жёсткой физической привязки, лазеры должны обладать возможностью перестройки по частоте (длине волны) излучаемого света. Кроме того, для некоторых экспериментов (условно говоря, спектральных) требуется узкополосное непрерывное излучение, а для других (временных) — краткие регулярные импульсы, соответственно, в состав стенда входят лазеры различной конструкции.

Традиционно, для исследования нелинейных процессов принято использовать лазеры большой мощности, однако, как было не раз подчёркнуто во Введении, главной целью разработки оптических вычислительных элементов является достижение *малых* рабочих мощностей, так что номинальная мощность используемых в стенде лазеров невелика, да и имеющийся в распоряжении резерв мощности используется не полностью, ради стабильности и воспроизводимости характеристик лазерного пучка. Перед образцом лазерные пучки ослабляются до требуемой конкретным экспериментом мощности.

В качестве непрерывного ранее использовался полусамодельный титан-сапфировый лазер с аргоновой накачкой, однако по технологическим причинам (малый и непредсказуемый ресурс отечественных аргоновых трубок) он был заменён на полупроводниковый лазер «Lynx» производства Sacher Lasertechnik. Импульсный лазер, используемый в настоящее время — титан-сапфировый «Tsunami», накачиваемый сложным DPSS (diode-pumped solid state) лазером «Millenia-V», оба производства Spectra-Physics.

## 2.1.1 Lynx

По принципу действия Lynx является полупроводниковым лазером с инжекционной<sup>1</sup> накачкой, подобным лазерам, используемым в компьютерных оптических приводах, красных лазерных указках, локальных оптоволоконных сетях и т. п., однако имеет несколько конструктивных особенностей.

Так же, как и у массово выпускающихся лазеров, активная среда Lynx'a выполнена в виде узкой полоски полупроводниковой гетероструктуры, выращенной на подложке и снабжённой вторым контактом с верхней стороны. Эта же самая структура служит и волноводом, ограничивающим распространение излучения внутри кристалла. Однако торцы структуры, которые обычно служат зеркалами лазерного резонатора, в данном случае специально обработаны (снабжены просветляющим покрытием и скошены) так, чтобы отражение от них в рабочем диапазоне длин волн было минимальным. Каждый торец находится в фокусе своей линзы (тоже снабжённой просветляющими покрытиями), которые сопрягают волноводную моду резонатора с параллельными пучками света во внешнем пространстве. Благодаря такой конструкции, свойства активной среды определяют лишь поперечную структуру генерируемого излучения (причём наиболее выгодным для применений образом - в виде узкого одномодового луча), а продольный модовый состав, в частности, длина волны, управляется в значительной мере внешними по отношению к полупроводнику деталями резонатора.

В лазере Lynx внешний резонатор состоит из выходного полупрозрачного плоского зеркала с одной стороны и дифракционной решётки, работающей в автоколлимационном режиме (то есть когда дифрагировавший от решётки свет отражается строго в обратном направлении по отношению к падающему; так называемая схема Литтрова) - с другой. В такой схеме грубая<sup>2</sup> пресстройка длины волны осуществляется поворотом решётки, а тонкая - изменением оптической длины резонатора. Поскольку в резонатор входит и участок полупроводника — активной среды, постольку оптическая длина резонатора зависит от эффективного показателя преломления последней, который, в свою очередь, связан как с током накачки (концентрацией носителей), так и с температурой кристалла<sup>3</sup>.

Оба последних параметра имеют возможность независимой регулировки, для чего блок питания лазера содержит отдельные электронные модули<sup>4</sup>. Кроме того, механический привод поворота решётки сделан двухступенчатым: грубый поворот осуществляется микрометрическим винтом с головкой

---

<sup>1</sup>Непосредственно электрическим током.

<sup>2</sup>Точность установки длины волны определяется количеством засвеченных лучом штрихов решётки.

<sup>3</sup>Регулируемой при помощи особого термоэлектрического элемента в небольших пределах относительно комнатной температуры.

<sup>4</sup>Модуль регулировки тока выполняет также функцию защитного ограничения последнего.

под ключ, доступной после снятия кожуха лазера, а более точно решётку можно повернуть при помощи пьезоэлемента, наклеенного на торец винта и снабжённого отдельным источником управляющего напряжения. Для согласования поворота решётки и длины резонатора два управляющих параметра, а именно, ток накачки и напряжение пьезоэлемента, могут быть связаны между собой произвольной линейной зависимостью, подобрав коэффициенты которой, можно добиться плавной перестройки длины волны лазера в известном диапазоне, пусть и ценой изменения мощности в процессе перестройки.

Небольшая часть света не претерпевает дифракции на решётке, а отражается от неё зеркально (так называемый «нулевой порядок» дифракции) под острым углом, меняющимся при перестройке лазера. При помощи дополнительного зеркала, механически связанного с решёткой и образующего с нею перископическую оптическую схему, этот «посторонний» луч можно направить на отдельный фотоприёмник с целью косвенного контроля и/или стабилизации выходной мощности лазера. Благодаря анизотропии как активной среды, так и решётки, лазер генерирует свет преимущественно одной линейной поляризации (вертикальной по отношению к конструктивному основанию головки). Из-за довольно высокого пропускания выходного зеркала (то есть сильной связи резонатора с окружающим пространством) лазер чувствителен к попаданию рассеянного и/или отражённого света обратно в резонатор, что при точных измерениях может быть источником помех и потребовать принятия соответствующих мер.

Конструктивно лазер выполнен в виде малогабаритной головки, легко устанавливаемой в оптическую схему, и стандартного 19" электронного блока, в который вставлены соответствующие модули питания и регулировки, соединённые с лазерной головкой различными кабелями (один кабель служит для питания активной среды и контроля тока фотоприёмника, другой — для питания термоэлемента и контроля температуры, а третий — для подачи высокого напряжения на пьезоэлемент). Разъёмы всех трёх кабелей сделаны различными с целью затруднить неправильный монтаж лазера. Кроме того, лазерная головка имеет особый высокочастотный разъём, соединённый с кристаллом через электрический фильтр высоких частот и предназначенный для модуляции характеристик излучения (как длины волны, так и мощности, в зависимости от режима работы лазера и параметров модулирующего сигнала) переменным током.

Производитель (Zacher Lasertechnik) предлагает головки с различными активными кристаллами, в нашей лаборатории используются перестраиваемые в диапазоне 795–830 нанометров. Максимально допустимый рабочий ток головки указан на шильдике, что в принципе позволяет использовать любую головку с любым блоком электроники (при условии корректного ввода предельного значения тока в последний). Мощность излучения, как правило, составляет порядка 100 мВт, что, вообще говоря, уже может быть опасным для здоровья и требует соблюдения соответствующих мер безопасности, крат-



ко, но ёмко сформулированных в известной пословице: **Не заглядывай в лазер оставшимся глазом!**

## 2.1.2 Tsunami

Пригодная к употреблению технология универсальных (то есть перестраиваемых в широком диапазоне параметров) импульсных лазеров с непосредственной электрической накачкой в настоящее время отсутствует, поэтому в качестве источника импульсного света используется титан-сапфировый лазер с оптической накачкой «Tsunami». Главной особенностью кристаллического сапфира, легированного ионами  $Ti^{2+}$ , как лазерной активной среды, является чрезвычайно широкая полоса усиления, охватывающая с запасом весь интересующий нас диапазон 0.7–1  $\mu m$ . Благодаря этому титан-сапфировые лазеры используются для генерации как непрерывного излучения, перестраиваемого в широком диапазоне, так и сверхкоротких (до десятков пикосекунд) импульсов, обладающих, согласно соотношению неопределённости, широким спектром. Кроме того, сапфир как оптический материал обладает замечательной лучевой прочностью, что позволяет использовать при работе лазера нерезонансные нелинейные эффекты, о чём подробнее будет сказано ниже.

Кристалл сапфира, легированного титаном, смонтирован в оптическом фокусе так называемого «Z-образного резонатора», содержащего два наклонных вогнутых зеркала, установленных приблизительно конфокально, а также (условно говоря) верхнее и нижнее плечи с практически параллельным ходом лучей и плоскими торцевыми зеркалами. Астигматизм наклонно установленных вогнутых зеркал в первом порядке компенсируется астигматизмом торцов кристалла, срезанных под углом Брюстера и расположенных в сходящихся пучках. Для более точной настройки оба вогнутых зеркала и кристалл имеют независимые подвижки вдоль оси пучка. Излучение накачки вводится в кристалл сквозь одно<sup>5</sup> из вогнутых зеркал (которые специально для этого изготовлены прозрачными в сине-зелёной области спектра и имеют качественно отполированную и просветлённую обратную сторону) при помощи аналогичного вогнутого фокусирующего зеркала. Для точной компенсации расходимости накачивающего пучка последнее имеет необходимые степени свободы, в том числе и вдоль луча. Металлическая обойма кристалла имеет каналы, подключённые к системе водяного охлаждения, поскольку при типичных рассеиваемых в кристалле мощностях (единицы ватт) естественного охлаждения недостаточно.

Вообще говоря, Tsunami является универсальным прибором, который посредством замены оптических элементов может быть переоборудован для работы в различных режимах и/или диапазонах. В нашей практике используется режим генерации так называемых «фемтосекундных импульсов» (реально

---

<sup>5</sup>Верхнее.

имеющих длительность сотни фемтосекунд, в противовес единицам пикосекунд «пикосекундного» режима и десяткам пикосекунд — режима «сверхдлинных импульсов») с самосинхронизацией мод в диапазоне длин волн 730–850 нанометров. В этом режиме (наряду с зеркалами, оптимизированными в указанном спектральном диапазоне) резонатор содержит в верхнем плече призмный компенсатор дисперсии, а также вспомогательный акустооптический модулятор вблизи верхнего торцевого (выходного) зеркала.

Основным механизмом, обеспечивающим устойчивую генерацию коротких импульсов, служит так называемая Керровская нелинейность активной среды, то есть практически безынерционное изменение показателя преломления кристалла под действием электрического поля световой волны. Иными словами, достаточно интенсивный сфокусированный свет наводит дополнительную линзу в кристалле (наряду со всегда присутствующей в мощных твёрдотельных лазерах инерционной линзой тепловой природы). Если съюстировать резонатор вблизи границы устойчивости рабочей моды, то можно обеспечить условия, при которых резонатор окажется устойчивым только в момент прохождения светового импульса через активную среду, а паразитный свет, излучённый в промежутках между импульсами, попадёт в неустойчивый резонатор и будет потерян без заметного усиления. Импульс как бы сам прокладывает себе устойчивую дорогу через неустойчивый резонатор.

Такой режим автогенерации характеризуется так называемым «жёстким» возбуждением, то есть при одном и том же уровне накачки в зависимости от предыстории может существовать генерация либо упорядоченной последовательности импульсов (при которой каждый следующий импульс — это усиленный остаток предыдущего, отразившийся от выходного зеркала и прошедший полный круг по резонатору, то есть импульсы в последовательности связаны между собою вполне определёнными фазовыми соотношениями), либо одной или нескольких квазинепрерывных мод со случайными фазами. Для принудительного перевода квазинепрерывной генерации в импульсную, лазер снабжён термостатированным акустооптическим модулятором. В последнем в прозрачной среде при помощи пьезоэлектрического элемента возбуждается стоячая акустическая волна, которая характеризуется тем, что в определённые моменты, дважды за период, вся энергия колебаний переходит в кинетическую форму, а упругие напряжения во всём объёме обращаются в нуль. В эти моменты потери света, проходящего через среду, минимальны. При точном совпадении полупериода акустических колебаний со временем обхода резонатора световыми импульсами, случайные флуктуации интенсивности света, совпадающие по фазе с нулями упругих напряжений, получают преимущество и в конце концов усиливаются до такого уровня, когда уже включается в работу керровская нелинейность активной среды. Во избежание проблем, связанных с точным согласованием длины резонатора и частоты генератора, питающего акустооптический модулятор, в качестве задающего

генератора выступает собственно лазерный свет, часть которого за выходным зеркалом при помощи светоделительной пластинки детектируется быстродействующим фотоприёмником, сигнал с которого усиливается, делится по частоте пополам и подаётся на модулятор. При достаточном коэффициенте усиления и должном фазовом соотношении между сигналом с фотоприёмника и акустическими колебаниями, у такой сложной системы (лазер + модулятор) остаётся только один устойчивый режим — генерация регулярных импульсов. Вся электроника между фотодетектором и модулятором вынесена в отдельный блок, который кроме основной функции (регулировки фазы при помощи большой чёрной ручки) выполняет и некоторые вспомогательные, такие как грубая индикация мощности пучка, формирование электрических сигналов для синхронизации различных внешних устройств и т. п.

Как уже упоминалось выше, короткие световые импульсы занимают широкую спектральную полосу, а значит время прохождения (фазовый набег) различных спектральных пакетов внутри этой полосы через оптическую схему резонатора может различаться. Дисперсию имеют как протяжённые среды (прежде всего сам сапфир), так и «короткие» элементы — диэлектрические зеркала, особенно если спектр импульса несимметричен относительно полосы отражения зеркала. В лазерах, предназначенных для генерации рекордно коротких импульсов, каждый элемент отдельно рассчитывается и изготавливается так, чтобы минимизировать суммарную дисперсию, однако в Tsunami используется другой подход: в резонатор вводится отдельный компенсатор, сконструированный так, что его дисперсия отрицательна и может регулироваться в известных пределах. Таким образом, появляется возможность не только скомпенсировать в первом порядке дисперсию остальных элементов резонатора, но и, при неполной компенсации, управлять спектральной шириной (а, следовательно, и длительностью) генерируемых импульсов.

В качестве такового компенсатора в фемтосекундном режиме используется вводимый в верхнее плечо резонатора двойной призмный монохроматор с вычитанием дисперсии [18] (естественно, поскольку он работает в очень малой апертуре, фактически в параллельном пучке, фокусирующие элементы в нём отсутствуют). Призмы, установленные так, что угол падения пучка на рабочие грани близок к углу Брюстера (во избежание потерь на отражение), раскладывают проходящий свет в спектр таким образом, что сильнее преломившиеся коротковолновые лучи проходят меньшее расстояние *между* призмами, так что суммарный фазовый набег у них оказывается меньше. Изменяя толщину введённого в луч стекла (согласованно двигая призмы вдоль биссектрис рабочего угла), можно регулировать дисперсию, не влияя на направление лучей и, следовательно, не нарушая юстировки резонатора. При помощи двух плоских зеркал монохроматор симметрично сложен так, что выходной пучок является продолжением входного, что облегчает юстировку лазера, а также его использование в тех режимах, в которых призмная компенсация не требуется и призмы выведены из пучка.

Посередине между призмами имеется область пространства, в которой генерируемый лазером свет разложен в спектр, то есть разные спектральные пакеты распространяются геометрически разными путями. В Tsunami в этой области находится подвижная щель (как это и положено в монохроматоре), осущетвляющая спектральную селекцию и позволяющая перестраивать среднюю длину волны импульсов во всём диапазоне генерации. Кроме того, щель регулируется по ширине для согласования полосы пропускания спектрального селектора со степенью компенсации дисперсии.

Конструктивно лазер выполнен в виде настольного прибора, имеющего по торцам оптические порты<sup>6</sup> для ввода излучения накачки и вывода генерируемых импульсов и соединённого кабелями с электронным блоком модели 3955 (согласно фирменной номенклатуре Spectra-Physics). На самом лазере доступны регулировки подъюстировки торцевых зеркал резонатора, положения призм и положения щели (плюс регулятор ширины щели под ключ), а также кнопка включения и регулировка фазы на электронном блоке. Кроме того, имеются ручки и кнопки, не задействованные в фемтосекундном режиме. Остальные органы управления находятся внутри и доступны после снятия крышки, причём большинство из них требуют для правильной установки специальной оснастки. Какими органами разрешено манипулировать и в каких случаях — подробно описано в инструкции по эксплуатации. В частности, наиболее употребительная настройка — нахождение максимума выходной мощности подъюстировкой крайних зеркал резонатора.

Мощность Tsunami достигает нескольких сотен милливатт, так что к мерам безопасности при работе с этим лазером следует относиться ещё более серьёзно. **Намеренное или случайное попадание прямого или рассеянного лазерного света в глаза или на кожу может нанести вред здоровью.**

### 2.1.3 Millenia

Для нормальной работы Tsunami требует высокостабильной накачки лазерным лучом хорошего качества (одномодовой поперечной структуры и т. п.) в сине-зелёном спектральном диапазоне. Традиционно для этой цели применялись газоразрядные лазеры на ионах аргона, излучающие несколько спектральных линий (наиболее интенсивные — 514 и 488 нм). Однако таким лазерам присущи недостатки: большая потребляемая мощность (и, как следствие, необходимость мощной системы водяного охлаждения, связанной с низкочастотными шумами излучения, вызванными турбулентным потоком воды через лазер) и ограниченный ресурс активного элемента (газоразрядная трубка, работающая под весьма высокими нагрузками, склонна как к постепенной деградации, вызванной распылением материала внутренних деталей

---

<sup>6</sup>Прикрытые от пыли и сквозняков плоскими стеклянными окнами, наклоненными под углом Брюстера.

под действием ионной бомбардировки, так и к катастрофическим отказам, связанным с растрескиванием и потерей герметичности стеклянных или керамических оболочек). С появлением мощных твёрдотельных лазеров на полупроводниковых гетероструктурах возникла технология DPSS, типичным представителем которой является Millenia (точнее, Millenia-V, второе поколение зелёных DPSS лазеров фирмы Spectra-Physics). Поскольку основным назначением этих лазеров является по возможности прямая замена газоразрядных аргоновых, они имеют некоторые конструктивные особенности, не свойственные DPSS лазерам как таковым.

Как и вышеописанные лазеры, Millenia состоит из оптической головки и блока питания, связанных между собой кабелем. Однако этот кабель в данном случае неразъёмный, поскольку мощность передаётся по нему в *оптическом* виде, через два пучка световодов. Источником мощного света (с длиной волны около 800 нм) служат две батареи полупроводниковых лазеров, размещённые в блоке питания и снабжённые, наряду со стабилизатором рабочего тока, мощным терморегулятором-термостатом. Каждый полупроводниковый лазер в батарее тщательно согласован со своим световодом в пучке и составляет с ним неразъёмное конструктивное целое.

Внутри оптической головки лазера Millenia находится модифицированный Z-образный резонатор, в фокусе которого размещена активная среда — кристалл фторида иттрия-лития, легированный трёхвалентными ионами неодима. Последние обладают наиболее подходящими характеристиками для мощных твёрдотельных лазеров, и излучают на длине волны 1.06  $\mu\text{м}$ . Излучение накачки, преобразованное путём изменения конфигурации пучка световодов из целевой формы в круглую, фокусируется на торцы активного элемента, из каждого пучка в свой торец. Активная среда лазера Millenia также требует водяного охлаждения, практически аналогичного по параметрам охлаждению Tsunami. Фактически, оба лазера охлаждаются потоком воды от одного и того же лабораторного термостата. Поскольку выделяемая в активных средах мощность невелика, порядка 10 Вт, поток воды достаточно слабый, чтобы течение было ламинарным и не создавало дополнительных помех.

Поскольку длина волны излучения полупроводниковых лазеров зависит от температуры, появляется возможность (необходимость) согласования спектра накачки со спектром поглощения ионов неодима, то есть настройки линии излучения полупроводниковых лазеров на полосу поглощения неодима. Технически такая настройка осуществляется путём индивидуального подбора температуры каждой батареи, ориентируясь на оптимальную работу лазера.

Как уже говорилось выше, неодим излучает инфракрасный свет на длине волны 1.06  $\mu\text{м}$ , так что для получения зелёного света приходится применять удвоение оптической частоты при помощи нелинейного элемента (кристалла йодата лития). Кристалл расположен в дополнительном фокусе резона-

тора, а отделение второй гармоники (532 нм) осуществляется при помощи дихроичных зеркал (зеркала основного резонатора отражают инфракрасный свет, но прозрачны для зелёного, а дополнительное фокусирующее зеркало — наоборот). Для эффективного преобразования инфракрасного света в зелёный требуется выполнение нескольких условий: определённого модового состава излучения (обеспечивается конструкцией резонатора), достаточной мощности инфракрасной генерации и строгого термостатирования нелинейного кристалла. Перед выходом из оптической головки зелёный пучок подвергается повороту плоскости поляризации и телескопическому расширению, чтобы приблизиться по параметрам к лучу типичного аргонового лазера (с гораздо более длинным резонатором). Малая часть пучка ответвляется на фотоприёмник встроенного измерителя мощности. Для того, чтобы высота луча над оптическим столом также соответствовала аргоновому лазеру, к компактной головке прилагаются монтажные колонки, с помощью которых она и устанавливается на стол.

Как мы видим, лазер работает в оптимальном режиме по множеству параметров — механические степени свободы (юстировки) резонатора, температуры полупроводниковых диодов и нелинейного кристалла и т. д. Иными словами, при изменении любого параметра в любую сторону работа лазера только ухудшается (падает выходная мощность и/или качество пучка). Поддержанием и регулировкой этих параметров занимается микропроцессорная система управления, снабжённая выносным пультом. Фактически, при повседневном пользовании задействованы только функции пуска и установки выходной мощности (необходимость последней возникает сравнительно редко, поскольку оптимальная для Tsunami мощность — около 5 Вт — одновременно является и максимальной выходной мощностью Millenia). В предыдущей модели Millenia пользователю были доступны юстировки одного из зеркал резонатора, однако в силу более компактной и жёсткой конструкции резонатора Millenia-V надобность в подъюстировке в процессе эксплуатации отпала. Тем не менее, оба лазера (и Tsunami, и Millenia) работают заметно стабильнее в условиях контролируемой (стабилизированной) температуры в помещении лаборатории.

Большая (номинально 5 Вт) выходная мощность лазера «Millenia» требует отнести его к высшему, четвёртому классу опасности и **соблюдать строгие меры безопасности при работе и настройке**. Фактически, лазерный луч на всём своём протяжении защищён от случайного доступа (а также задно и от пыли) металллическими кожухами.

## 2.2 Диагностика пучка

Для плодотворной исследовательской работы необходимо, чтобы лазер работал устойчиво, а параметры его излучения были известными и управля-

емыми, иначе всё внимание исследователя будет поглощено обслуживанием аппаратуры, а не получением и анализом осмысленных результатов. Поэтому в состав стенда входит набор средств, позволяющих оперативно, то есть в реальном времени, отслеживать основные параметры лазерного пучка: пространственный профиль, мощность и спектральный состав, длительность и частоту повторения импульсов. Эти же инструменты, в силу быстрого отклика и разностороннего характера предоставляемой информации, значительно облегчают начальную юстировку и настройку лазера.

## 2.2.1 Пространственные параметры

Чувствительность человеческого зрения в ближнем инфракрасном диапазоне экспоненциально падает в сторону длинных волн. Если свет с длиной волны 750 нм ещё хорошо виден как ярко-красный, то рассеянный свет 850 нм уже с трудом различается на фоне обычного комнатного освещения, а чтобы увидеть свет с длиной волны 950 нм, его мощность должна приближаться к опасному для здоровья уровню. Поэтому технология визуальной юстировки и контроля оптических схем, широко применяемая при работе с видимыми светом, в нашем случае сопряжена с рядом трудностей и неудобств.

В то же время, кремниевые фотоприёмники в этом диапазоне имеют максимальную чувствительность. Со времён изобретения кремникона (передающей телевизионной трубки с кремниевой мишенью и развёрткой электронным лучом) появилась простая возможность получать изображение, а в нынешние времена, с распространением ПЗС и/или КМОП фотоприёмных матриц, эта возможность стала ещё и дешёвой. Применительно к задаче измерения и контроля распределения светового поля в пространстве использование коммерческих видеокамер обладает рядом удобств (размеры приёмных площадок дешёвых камер как раз соответствуют типичному поперечному сечению лазерного пучка из устойчивого резонатора полутораметровой длины; малогабаритную камеру легко поместить между последовательными элементами оптического тракта при настройке и убрать при работе; видеосигнал допускает как качественный, визуально на экране монитора, анализ, так и количественный, такой как построение профилей пучка, при помощи стандартной телевизионной измерительной аппаратуры и/или компьютера, снабжённого стандартными средствами ввода телевизионного сигнала; использование нескольких камер позволяет одновременно контролировать пучок в разных участках оптического тракта и т. д.), а так же известными недостатками, наиболее неприятные из которых — небольшой динамический диапазон мелких ПЗС-матриц (как правило, для успешной регистрации интенсивность лазерного пучка приходится многократно ослаблять при помощи светофильтров, рассеивателей с диафрагмируемыми объективами и т. п. дополнительных оптических элементов, вносящих свои искажения) и наличие в дешёвых камерах неотключаемых автоматических реулировок (коэффициент усиления,  $\gamma$ -кор-

рекция, длительность экспозиции), затрудняющих количественный анализ амплитудной информации, содержащейся в видеосигнале. Видеокамеры можно использовать как непосредственно, помещая чувствительную площадку в исследуемый пучок, так и стандартным образом, в комплекте с объективами (при этом масштаб изображения регулируется в широких пределах путём подбора объективов и/или удлинительных колец, каковой процесс облегчается стандартизацией присоединительных размеров). Во втором случае обычно исследуется некогерентный рассеянный свет, например, люминесценция, испускаемый некоторой поверхностью. Если поверхность рассеивает когерентный (лазерный) свет, то наблюдаемая картина может быть промодулирована *спеклами* фазовой природы, которые в зависимости от задачи либо анализируются (как правило, статистическими методами) с извлечением полезной информации, либо усредняются путём модуляции фазовых свойств рассеивателя на временах короче времени экспозиции видеокадра.

Ещё один вариант (как правило, чисто визуального) контроля пространственного распределения инфракрасного света предоставляют приборы ночного видения на основе *электронно-оптических преобразователей* (ЭОП). Они обычно выполняются в виде зрительной трубы (бинокля), иногда с возможностью смены объектива, и, будучи снабжёнными плёночными фотокатодами с внешним фотоэффектом, могут иметь спектральную чувствительность в тех областях, которые недоступны кремниевым фотоприёмникам. Поскольку ЭОП — это каскад из световых и электронных оптических элементов, аберрации и прочие искажения накапливаются, и геометрическое качество итогового изображения невелико. С другой стороны, динамический диапазон ЭОП, как правило, превышает динамический диапазон кремниевых матриц.

## 2.2.2 Мощность

Для измерения мощности используется два метода: тепловой и фотоэлектрический.

Первый связан с полным поглощением лазерного света (для чего в луч вводится массивная измерительная головка с чёрной фотоприёмной площадкой, снабжённой термоэлектрическим преобразователем) и обладает заметной инерционностью, однако абсолютная и практически не зависящая от длины волны калибровка делает этот метод незаменимым для решения задач, связанных с измерением абсолютной мощности, таких как определение степени деградации активного элемента лазера или проверка соответствия характеристик лазера опубликованной спецификации. Некоторые термоэлектрические приборы, например, Spectra-Physics модель 401, имеют электронную компенсацию тепловой инерции (по крайней мере, в первом порядке), другие, такие как отечественный ИМО-2М — встроенный в измерительную головку электронагреватель для точной абсолютной калибровки, третьи (многие измерители фирмы Ophir) — индикатор положения луча на измерительной



площадке, особенно удобный при работе с невидимым излучением, однако общие метрологические характеристики у них сходны. В частности, при измерении мощностей порядка десятков милливольт и менее, требуется тщательное слежение за посторонними тепловыми потоками в районе измерительной головки и аккуратная подстройка нуля перед каждым существенным измерением, а большие плотности мощности (приблизительно от ватта на квадратный миллиметр) могут вызвать необратимую деградацию метрологических свойств измерительной головки.

Фотоэлектрические измерители мощности работают по принципу регистрации фототока носителей, рождённых поглощением квантов регистрируемого излучения в кристалле полупроводника, например, кремния. Они демонстрируют внушительный динамический диапазон (свыше 80 дБ в отдельных случаях), практически безынерционны, приёмная головка может быть чрезвычайно компактна (по конструкции кремниевый фотодиод практически идентичен обычному кремниевому диоду в корпусе с оптическим окном), однако обладают серьёзным недостатком: зависимостью чувствительности от длины волны измеряемого света. Даже идеальный прибор со 100%-ным квантовым выходом имеет энергетическую чувствительность, обратно пропорциональную длине волны. Некоторые приборы, например Spectra-Physics модель 404, пытаются компенсировать эту зависимость при помощи светофильтра (разумеется, в ограниченном диапазоне спектра), другие снабжаются таблицами пересчёта для наиболее популярных длин волн, однако наибольшее применение фотоэлектрические измерители нашли для оперативного контроля *относительных* изменений мощности лазера заранее известной длины волны. В частности, встроенный измеритель мощности Millenia настолько точен и надёжен, что нет необходимости использовать для этой цели другие средства, а Tsunami снабжена двумя измерителями: встроенным с аналоговой шкалой и самодельным с цифровым индикатором, свет на которые ответвляется от основного пучка при помощи стеклянных светоделителей.

### 2.2.3 Спектр

Как непрерывный, так и импульсный лазеры излучают свет вполне определённого спектрального состава. У непрерывного лазера спектр состоит из одной линии<sup>7</sup>, однако её частота (длина волны) меняется под воздействием различных факторов и требует контроля; а также возможны (обычно при неисправности лазера или при неудачном согласовании длины резонатора с углом поворота решётки) режимы паразитной генерации побочных линий и/или полос, требующие исправления. Свет импульсного лазера занимает конечный спектральный интервал вокруг некоторой средней частоты. Ширина

---

<sup>7</sup>Если не принимать во внимание фоновое излучение нелазерной природы, такое как спонтанная люминесценция активной среды или рассеяние света накачки.

интервала определяется длительностью импульса, то есть спектральный анализ в этом случае даёт два существенных параметра. У импульсного лазера также возможны паразитные и промежуточные режимы генерации, требующие спектрального контроля. Для этого контроля обычно используются спектральные приборы либо с оптическим, либо с цифровым преобразованием Фурье.

Первые содержат в своём составе входную щель, фокусирующие элементы, дифракционную решётку и фотоприёмник изображения. Поскольку лазерный свет обладает чрезвычайно большой яркостью, такой волномерный спектрограф может иметь весьма умеренную апертуру (относительное отверстие), что позволяет изготавливать его самостоятельно из доступных оптических элементов, не опасаясь aberrаций высших порядков, которые все быстро уменьшаются по мере уменьшения относительного отверстия. Более того, низкий динамический диапазон требуемого спектра (по сравнению с другими спектральными задачами, например, регистрацией комбинационного рассеяния) позволяет применять упрощённую схему (единственный линзовый объектив, совмещающий в себе функции коллиматорного и камерного), а также коммерческие видеокамеры в качестве фотоприёмника; в последнем случае видеосигнал, представляющий спектр, можно как наблюдать непосредственно на видеомониторе, так и анализировать при помощи стандартной измерительной техники (осциллографов и т. п.), применяемой в телевизионной промышленности. Спектральный диапазон такого спектрографа определяется фокусным расстоянием линзы и пространственной частотой штрихов решётки (с учётом порядка дифракции), а разрешение зависит ещё и от апертуры и точности юстировки объектива.

Спектральные приборы второго типа работают по принципу двухлучевого интерферометра [19] с приблизительно равномерным распределением интенсивности света по двум плечам, и кроме собственно интерферометра содержат фотоприёмник для записи интерферограммы и вычислитель, производящий Фурье-анализ последней. Применяются интерферометры как со сканированием разности хода лучей во времени (Advantest TQ8325, на основе интерферометра Майкельсона с двойным ходом лучей: в «прямом» направлении проходит измеряемый свет, а в «обратном» — свет эталонного гелий-неонового газоразрядного лазера, использующийся для непрерывной калибровки прибора), так и с пространственным сканированием (последние обычно содержат каскад неподвижных кварцевых плоскопараллельных или клиновидных эталонов Фабри-Перо различной толщины, данные анализа изображений интерференционных полос с которых сшиваются при помощи калибровочных коэффициентов, набор которых индивидуален для каждого прибора), причём последние, как правило, отличаются более компактными габаритами оптической схемы. Большая яркость (малая апертура) измеряемого лазерного излучения позволяет вполне успешно использовать любой из этих двух методов.

Конструкция и условия работы применяемых на стенде лазеров таковы,

что, будучи однажды настроенными, они сохраняют свои спектральные характеристики на время эксперимента, так что в качестве спектрального монитора можно пользоваться теми же самыми спектральными приборами, которые применяются для исследования образца, пусть и с меньшей оперативностью, нежели специально выделенными спектральными приборами. Более того, такая методика имеет определённые метрологические преимущества, поскольку с физической точки зрения важны не столько абсолютные значения характерных частот в спектре лазера и образца, сколько их соотношения, так что систематические погрешности спектральной калибровки приборов в значительной мере компенсируются.

## 2.2.4 Автокорреляция

Для измерения и контроля временной структуры импульса (длительности, закона нарастания фронта, наличия и величины паразитных спутников-послеимпульсов) требуется прибор с временным разрешением порядка длительности импульса или лучше. Однако сотни пикосекунд длительности импульса — самый короткий физический временной масштаб из имеющихся в системе<sup>8</sup>. Поэтому приходится стробировать импульс при помощи того же самого импульса, сдвинутого по времени на известную величину. Такая техника называется *автокорреляционной*, и, хотя связана с потерей части информации (например, о направлении времени), даёт адекватное представление о временных масштабах исследуемых процессов и является стандартной при работе со сверхкороткими лазерными импульсами.

По конструкции автокоррелятор — это тот же самый интерферометр Майкельсона, как правило, с временным сканированием, однако анализируется не спектр, а непосредственно интерферограмма. Для повышения частоты сканирования (оперативности обновления кадров) вместо возвратно-поступательно движущихся зеркал часто применяются вращающиеся элементы (плоскопараллельные пластины и т. д.), хотя это и снижает эффективность сканирования (отношение длительности рабочего хода к полному периоду развёртки).

Таким образом, мы видим, что спектральный и автокорреляционный контроль дают по существу одну и ту же информацию о параметрах импульсов, только представленную в разной форме. Для решения тех или иных задач бывает удобнее пользоваться либо той, либо другой методикой, а иногда и обеими вместе.

В отдельных случаях (например, при исследовании кросс-корреляции между двумя независимыми лазерными источниками) вместо интерференции двух пучков света на поверхности фотодетектора применяют их трёхволновое<sup>9</sup> смешение в нелинейном кристалле (с последующим выделением корот-

---

<sup>8</sup>Период оптической частоты здесь не в счёт, поскольку неизбежно сопровождается соседними, практически одинаковыми периодами.

<sup>9</sup> $\vec{k} = \vec{k}_1 + \vec{k}_2$ .

коволнового продукта при помощи светофильтров). Такая методика накладывает известные требования на мощность смешиваемых пучков<sup>10</sup>, но зато нечувствительна к фазовым соотношениям между ними; так, например, можно исследовать взаимную корреляцию двух импульсных лазеров, работающих на разных длинах волн.

## 2.2.5 Частота

Частота повторения импульсов строго определяется конструкцией резонатора, точнее, временем его обхода. При стабильных окружающих условиях и устойчивом режиме работы лазера эта частота по воспроизводимости сравнима с кварцевым генератором. Однако при переюстировке и/или перестройке резонатора частота меняется заметно, иногда на доли процента. Кроме того, некоторые эксперименты (например, детектирование некогерентного свечения при помощи скоростных камер с электронной развёрткой, прореживание импульсов с помощью электронного затвора, синхронная работа двух лазеров и т. д.) требуют синхронизации работы электронных схем с лазерной генерацией. Для этого удобнее всего пользоваться готовыми электронными сигналами (с частотой повторения лазерных импульсов и ненормированной формой или, по выбору, меандром стандартной амплитуды и половинной частотой), формируемыми блоком 3955 специально для этих целей. Частотомер, подключённый к высокочастотному выходу блока, в нормальном режиме работы лазера показывает 80.0 МГц с небольшими отклонениями в шестом-седьмом десятичном знаке при времени накопления 1 с.

## 2.3 Управление свойствами света

Сам по себе лазерный свет можно рассматривать как некий «полуфабрикат», из которого путём фильтрации и других операций можно приготовить требуемую тем или иным конкретным экспериментом совокупность фотонов. Благодаря высокой когерентности лазерного света, даже продукты весьма сложной фильтрации остаются связанными между собой по фазе.

### 2.3.1 Светоделители

*Светоделитель* — это устройство, используемое обычно для того, чтобы из одного пучка света сделать два, распространяющиеся в разных направлениях. С точки зрения волновой теории, светоделитель делает из одной волновой

---

<sup>10</sup>Хотя эффективность нелинейного преобразования и определяется *плотностью* мощности, её нельзя беспрестанно увеличивать путём более жёсткой фокусировки, поскольку эффективная длина взаимодействия пучков при фокусировке уменьшается.

моды линейную суперпозицию двух других. Поскольку плотность мод в пространстве есть инвариант (линейные оптические операции обратимы), тот же самый светоделитель можно использовать и для решения обратной задачи — *объединения* двух различных мод в одну. В общем случае, светоделитель можно представить в виде линейного унитарного оператора  $2 \times 2$ , коэффициенты которого (отношение амплитуд и набег фаз) определяются конкретной конструкцией.

По конструкции светоделители обычно выполняются в виде прозрачного элемента, имеющего хотя бы одну рабочую поверхность, как правило, плоскую (так что большинство светоделителей может работать не только с одной волновой модой, но и с целым изображением в некоторой апертуре).

Если не налагается особых требований на коэффициент расщепления, в качестве такой поверхности может выступать просто полированная поверхность раздела стекло—воздух. Она наиболее проста в изготовлении, устойчива к оптическим нагрузкам и процедуре чистки, допускает самые различные геометрии распространения света, однако обладает двумя недостатками: во-первых, коэффициент отражения зависит от угла падения и, вообще говоря, разный для двух различных поляризаций (впрочем, это можно считать и достоинством, так, изменение коэффициента отражения от нуля при падении  $p$ -поляризованного света под углом Брюстера до единицы при скользющем падении позволяет использовать голые поверхности в любых схемах фиксированной геометрии, а поляризующие свойства служат основным принципом работы стопы Столетова — поляризационного прибора, хорошо подходящего для мощных пучков большой апертуры), и несимметричные условия распространения расщеплённых пучков: один распространяется в воздухе, а другой — в стекле. Последний недостаток можно компенсировать применением симметричных оптических схем, например, в интерферометрах, где для сведения пучков на выходе служит светоделитель, идентичный тому, который расщепляет входные пучки. Вторая поверхность светоделителя с голой рабочей поверхностью либо просветляется, либо, если коэффициент отражения от неё невелик, экспериментаторы просто мирятся с соответствующими потерями света.

Более сложные светоделители — полупрозрачные зеркала и светоделительные кубики — применяются обычно в оптических схемах, накладывающих специальные требования, например, работу с более-менее постоянным коэффициентом деления в достаточно широкой апертуре. Обычно они рассчитываются и изготавливаются под конкретную задачу, хотя некоторые разновидности (например, кубики с углом падения света на рабочую диагональ  $45^\circ$  и 50%-ным коэффициентом деления, или так называемые «поляризационные призмы» с коэффициентом пропускания  $\approx 100\%$  для одной поляризации и  $\approx 0\%$  для другой, составленные из двух или более кусков исландского шпата или другого двулучепреломляющего кристалла, ориентированных так, чтобы свет одной из поляризаций испытывал полное внутреннее отражение

на какой-либо поверхности) можно считать стандартными элементами.

Следует отметить, что большинство светоделителей обладают свойством изменять направление распространения одного из пучков, в то время как направление распространения другого, как правило, практически не меняется при юстировке (наклоне) светоделителя и близко к направлению распространения падающего пучка. В светоделителях кубиковой конструкции последние два направления могут совпадать с весьма хорошей (задаваемой при изготовлении как особый параметр) точностью.

В составе стенда светоделители выполняют множество различных функций. Это и отщепление малой части пучка в разных местах оптической схемы с диагностическими целями, и элементы интерферометров для когерентного детектирования, и составные части схем управления поляризацией, в частности, стабилизации состояния поляризации излучения полупроводникового лазера, которое само по себе подвержено заметным (по сравнению с естественным квантовым шумом) флуктуациям, но самое главное — это разделение лазерного пучка на несколько (обычно 2–3) с целью отдельного независимого регулирования их параметров.

### 2.3.2 Фильтры

Светофильтры, в отличие от светоделителей, являются, вообще говоря, необратимыми элементами, они поглощают (или иным способом выводят из оптической схемы) часть падающего на них света. Фильтры могут селективировать свет по спектру, по поляризации и даже по направлению распространения (*пространственные* фильтры), бывают также и неселективные (нейтральные) светофильтры, задача которых — ослабить интенсивность по возможности без нарушения остальных характеристик света.

Спектральные фильтры на основе окрашенных стёкол, как правило, дешёвы, но, в силу разупорядоченной природы стекла, не имеют резких спектральных границ, пропускание фильтра меняется плавно. Обычно они применяются для отделения интересующего спектрального *диапазона* от паразитных засветок, далеко отстоящих по спектру. Так, стекло, наполненное наночастицами полупроводника (размеры которых много меньше длины волны изучаемого света), хорошо пропускает свет, кванты которого попадают в запрещённую зону и поглощают более коротковолновые кванты, энергия которых соответствует межзонным переходам. С радиотехнической точки зрения такой фильтр аналогичен *фильтру нижних частот*. Изменяя состав и/или размеры полупроводниковых частиц, можно плавно и практически непрерывно двигать границу пропускания такого фильтра в довольно широких пределах, например, по всему видимому диапазону. К сожалению, эта перестройка доступна только в процессе изготовления фильтра (варка стекла и отжиг заготовки), так что при рутинных измерениях при необходимости перестройки фильтры приходится менять.

Фильтры верхних частот и/или узкополосные полосовые фильтры в семействе стеклянных светофильтров гораздо менее доступны, поэтому их делают на основе многослойных диэлектрических структур (в свете модных тенденций называемых также *одномерными фотонными кристаллами*) [20]. Они изготавливаются в виде чередующихся слоёв прозрачных диэлектриков с разным показателем преломления (например  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ ), чаще всего путём вакуумного напыления на подложку. Наиболее употребимые разновидности — это просветляющее покрытие, диэлектрическое зеркало и узкополосный фильтр.

*Просветляющее покрытие* содержит небольшое число слоёв постепенно уменьшающегося показателя преломления и служит для гашения отражения света от поверхности, на которую оно нанесено. При должном подборе коэффициентов преломления и/или толщин слоёв можно добиться либо весьма сильного гашения отражения для одной заданной длины волны (например, длины волны того или иного лазера), либо значительного ослабления отражений в более-менее широком спектральном диапазоне (например, середина видимого диапазона для фотографической и наблюдательной оптики).

*Диэлектрическое зеркало* — это структура из достаточно большого числа (десятки, иногда до сотен) слоёв, чередующихся так, что чётные слои имеют больший показатель преломления, а нечётные — меньший. Собственно, именно такие структуры и называются идеальными фотонными кристаллами, поскольку закон дисперсии фотонов в них напоминает закон дисперсии носителей в полупроводнике. В частности, существует диапазон частот света (аналог запрещённой зоны), для которого в структуре отсутствуют вещественные волновые вектора, то есть такой свет не может распространяться в структуре и (в идеальном случае) полностью *отражается* ею. На этом основано основное применение диэлектрических зеркал в качестве практически полностью отражающих элементов, не имеющих внутренних потерь и поэтому обладающих хорошей лучевой стойкостью. Ширина «запрещённой зоны» определяется контрастом между показателями преломления чётных и нечётных слоёв, так что любое диэлектрическое зеркало обладает свойством *дихроизма*: в некоторых спектральных диапазонах оно хорошо отражает свет, а в других — пропускает. Последнее свойство успешно используется, см., например, §2.1.2.

*Notch-фильтр*, или просто «интерференционный фильтр», можно рассматривать как тонкий эталон Фабри-Перо с многослойными диэлектрическими зеркалами, либо как фотонный кристалл с дефектом (непропорционально толстым слоем одного из диэлектриков) посередине. Такая структура имеет узкий резонанс (ширина которого определяется качеством покрытий и количеством слоёв), в фотонно-кристаллической терминологии называемый «уровнем» в запрещённой зоне. Из широкого спектра короткого импульса интерференционный фильтр вырезает только узкополосную часть, с сохранением фазовой когерентности. Отметим, что, в силу соотношения неопреде-

лённостей, длительность отфильтрованного импульса *увеличивается*, резонансный фильтр как бы «звенит» некоторое время после прихода короткого возбуждающего импульса.

Все разновидности многослойных диэлектрических фильтров работают лишь с компонентой волнового вектора, перпендикулярной плоскости слоёв. Вдоль слоя свет распространяется свободно. Это, в частности, означает, что, наклоняя фильтр по отношению к световому пучку и меняя тем самым нормальную компоненту волнового вектора, можно плавно регулировать спектральный состав проходящего света, причём в реальном времени. Удобно применять этот метод перестройки к узкополосным интерференционным фильтрам.

Особой разновидностью светофильтров являются *плёночные поляризаторы* — анизотропные среды, по-разному поглощающие свет двух ортогональных линейных поляризаций. Состоят они из прозрачной среды, в которой расположены ориентированные в одном направлении (например, путём растяжения эластичной среды) продолговатые частицы, поглощающие свет только одной поляризации. Это могут быть длинные молекулы органических красителей, нитевидные полупроводниковые кристаллы или вытянутые металлические частицы. Все плёночные поляризаторы работают в ограниченном спектральном интервале, определяемом соответствием энергии кванта нужной полосе поглощения молекулы, либо соответствием длины волны размерам частицы и т. п. Как правило, излучение с коротковолновой стороны рабочего диапазона полностью поглощается, а с длинноволновой — полностью пропускается независимо от поляризации.

### 2.3.3 Поляризационные элементы

Кроме рассмотренных выше поляризационно-чувствительных светоделителей (см. §2.3.1) и фильтров, в стенде используются также *фазовые пластинки*, которые тоже работают по принципу унитарного преобразования  $2 \times 2$ , только вместо направления распространения участвуют направления поляризации, то есть оба направления, перпендикулярных направлению распространения<sup>11</sup>. Поскольку таких перпендикулярных направлений много, поворачивая фазовую пластинку под тем или иным углом (а также рассматривая поляризацию в той или иной системе координат), можно получить различные эффекты.

Наиболее употребительны четверть- и полуволновые пластинки. В собственной системе координат они задерживают фазу горизонтально поляризованного света по отношению к фазе вертикально поляризованного на  $\pi/2$  и  $\pi$  соответственно. Рассмотрим несколько характерных частных случаев приме-

---

<sup>11</sup>Свет — поперечная электромагнитная волна, то есть имеет две колебательные степени свободы.



нения фазовых пластинок для изменения заданного состояния поляризации света на другое.

Если на полуволновую пластинку падает плоскополяризованный свет, плоскость поляризации которого наклонена по отношению к собственной системе осей пластинки на угол  $\alpha$ , то несложно вычислить, что после прохождения пластинки свет по-прежнему будет плоскополяризованным, однако его плоскость поляризации составит с осями пластинки угол  $-\alpha$ . В системе координат, связанных с плоскостью поляризации исходного пучка, пластинка повернёт плоскость поляризации на *двойной* угол  $2\alpha$ . В известном смысле такое поведение напоминает механический *планетарный редуктор*: при вращении пластинки плоскость поляризации выходящего света вращается вдвое быстрее и совпадает с плоскостью поляризации входящего света *четыре* раза за оборот.

Если на полуволновую пластинку падает циркулярно-поляризованный свет, то после её прохождения он по-прежнему будет циркулярно-поляризованным, но только в *противоположном* направлении. Ситуация не меняется при повороте пластинки, поскольку состояние поляризации света симметрично относительно такого поворота.

При падении плоскополяризованного света на четвертьволновую пластинку состояние поляризации прошедшего света также зависит от угла  $\alpha$ . При совпадении плоскости поляризации с одной из осей состояние не меняется, а в промежуточных положениях  $\alpha = \pm\frac{\pi}{4}, \pm\frac{3\pi}{4}$  свет поляризован циркулярно: *два* раза за оборот правоциркулярно и *два* раза за оборот — лево.

Разумеется, все вышеописанные манипуляции с поляризацией света можно проделывать и в обратном направлении, то есть поменяв местами «входной» и «выходной» лучи. Такой способ рассуждений удобен при применении поляризационно-чувствительного фотоприёмного прибора для детектирования света, состояние поляризации которого отличается от собственной поляризации прибора.

Из-за дисперсии разность фаз, вносимая фазовой пластинкой, может отличаться для разных длин волн. Иначе говоря, фазовые пластинки обладают *хроматизмом*. Составляя пластинку из нескольких слоёв с различной дисперсией, можно скомпенсировать хроматизм с известной точностью в заданном (не очень широком, порядка  $\pm 15\%$ ) спектральном диапазоне. Такие «ахроматические» пластинки на популярные диапазоны коммерчески доступны (например, фирма Newport) и очень удобны в применении, так как практически не требуют учитывать поправки на неидеальность<sup>12</sup>. В качестве фазовых поляризационных элементов с малой дисперсией используют также

---

<sup>12</sup>Хотя некоторые экспериментальные методы автоматически учитывают такие поправки. Например, при измерении поляризационного дихроизма методом *модуляции* при помощи вращения фазовой пластинки, сигналы, связанные с линейным и круговым дихроизмом отличаются по частоте модуляции, и могут быть отдельно измерены при помощи, вообще говоря, единственной пластинки с произвольной разностью фаз.

*ромбы Френеля*, в которых при полном внутреннем отражении образуется разность фаз между *S*- и *P*-поляризованными компонентами света. При типичных углах падения, существенно отличающихся как от критического угла полного внутреннего отражения, так и от предельного скользящего угла, эта разность фаз невелика, так что на практике применяют несколько отражений подряд от противоположных параллельных поверхностей. Четвертьволновый ромб Френеля использует два отражения и поэтому обладает перископическим эффектом (параллельно смещает ось луча на величину, несколько превышающую размер рабочей апертуры), а полуволновый составляют из двух симметрично расположенных четвертьволновых так, чтобы скомпенсировать перископический эффект. В силу длинного пути света в стекле, ромбы Френеля неприменимы там, где поглощение или дисперсия стекла могут создать трудности.

### 2.3.4 Модуляторы

Для повышения чувствительности экспериментальных методик, и, в частности, для устранения широкого класса систематических погрешностей, в экспериментальной физике широко применяются *модуляционные* методы, в частности, связанные с синхронным детектированием (см. § 5.2). Модулировать можно самые различные параметры образца, например, все те, которые зависят от состояния освещающего образец света. Иными словами, модуляция света тем или иным способом позволяет решить широкий круг измерительных задач.

Один из вариантов — модуляция состояния поляризации света при помощи вращающейся фазовой пластинки — рассматривался в предыдущем разделе. Пропустив модулированный таким образом свет через поляризационный фильтр, можно получить строго синусоидальную амплитудную модуляцию. Однако механическое вращение сильно ограничивает доступный *диапазон частот* модуляции. Впрочем, на сколь угодно низких частотах (при аккуратном вращении фазовой пластинки вручную) такая конструкция служит неплохим *аттеньюатором*, применяемым для плавного регулирования интенсивности светового пучка.

Обойти такое ограничение можно, если изменять состояние света не два (четыре) раза за оборот, а больше. Особенно удобно это делать в случае прямой амплитудной модуляции при помощи вращающегося диска с прорезями. При нескольких десятках прорезей частота модуляции может быть доведена до нескольких кГц при вполне приемлемой скорости вращения диска. Дополнительным преимуществом такого модулятора является малое искажение светового пучка: между прорезями свет блокируется практически полностью, а проходящий сквозь прорезь луч не имеет на своём пути никаких препятствий, кроме слегка движущегося воздуха. В состав стенда входят подобные модуляторы, снабжённые дополнительной оптикой, с ко-

торой снимается «опорный» электрический сигнал, связанный по фазе с модуляцией рабочего луча, и электродвигателем постоянного тока, питаемым от схемы управления. В состав последней входит система *фазовой автоподстройки частоты*, сравнивающая частоты опорного сигнала и внешнего генератора и позволяющая таким образом задавать частоту модуляции извне. Поскольку от внешнего генератора используется только частотная информация, можно использовать любые популярные генераторы — импульсные с ТТЛ-уровнями на выходе, звуковые стандартной амплитуды (1 В эфф.), звуковой выход компьютера и т. д.

Для получения модуляции на ещё более высокой частоте приходится опять возвращаться к принципам поляризационной и/или фазовой модуляции (с добавлением при необходимости поляризационных фильтров). Чаще всего используются *электро-* и *акустооптические* модуляторы (см. § 2.1.2), работающие по принципу создания наведённого двулучепреломления в прозрачной среде под действием электрического поля или механических напряжений. Последние создаются внешними источниками (генераторами), тем самым давая большую свободу выбора параметров модуляции.

Электрооптические модуляторы, в зависимости от свойств симметрии прозрачной среды, могут использовать как эффект Поккельса, так и эффект Керра. Оба они обладают весьма высоким быстродействием, однако требуют больших электрических полей (порядка сотен вольт на миллиметр), так что практически их быстродействие ограничено быстродействием генератора<sup>13</sup>. Изменяя геометрию среды (отношение размеров вдоль распространения луча к размерам вдоль электрического поля), можно достигать того или иного компромисса между требуемой величиной управляющего напряжения, межэлектродной ёмкостью и световой апертурой. В затворах Поккельса фазовый сдвиг линейно зависит от приложенного напряжения, а в затворах Керра — квадратично, так что получение синусоидальной модуляции по *времени* сопряжено с трудностями. С электрической стороны электрооптические модуляторы представляют собой небольшую ёмкость, от единиц пикофарад для ячеек Поккельса продольной геометрии и до десятков-сотен пикофарад для длинных поперечных ячеек, так что схемотехника генераторов сходна со схемотехникой радиопередатчиков (для работы на синусоидальном сигнале) или осциллографов (при использовании модулирующих сигналов сложной формы). В составе стенда используются сдвоенные поперечные ячейки Поккельса, в которых два кристалла, составленные последовательно в оптическом канале и параллельно — в электрическом, развёрнуты таким образом, чтобы двулучепреломление, наведённое электрическим полем, складывалось от обеих половин, а естественное двулучепреломление, зависящее от температуры — вычиталось.

---

<sup>13</sup>Поскольку в низкосимметричных средах электрооптический и пьезоэлектрический эффекты скоррелированы, у многих электрооптических модуляторов имеется область частот, в которой механические резонансы нарушают правильную работу модулятора.

Акустооптические модуляторы делятся на два класса: резонансные, или модуляторы стоячей волны, и широкополосные модуляторы бегущей волны.

В первых в рабочем режиме акустическая стоячая волна занимает весь рабочий объём прозрачной среды, и, как и в любом резонаторе, четыре раза за период переходит из состояния, когда вся энергия колебаний запасена в упругих напряжениях, в состояние, когда напряжения близки к нулю, а вся энергия находится в кинетическом виде, и обратно. Модуляция света происходит в «потенциальной» части цикла. Если длина акустической волны мала, то есть сравнима с длиной волны света, то основные потери происходят за счёт дифракции на акустической волне<sup>14</sup>, а модуляция синусоидальна по времени. В противоположном пределе, когда длина акустической волны намного превосходит поперечные размеры луча, основной механизм модуляции связан с двулучепреломлением, и временная зависимость параметров света выражается через функции Бесселя. Высокочастотные модуляторы обычно работают на частотах в десятки–сотни мегагерц (и питаются от отдельного генератора, настроенного в резонанс), а низкочастотные — десятки килогерц, и питаются по автогенераторной схеме, аналогичной стандартным схемам кварцованных автогенераторов, только несколько большей мощности. При этом амплитуду колебаний (глубину модуляции) удобно регулировать напряжением питания генератора. Амплитуда упругих напряжений в материале не должна превышать предела разрушения клеевого шва, через который возбуждающий колебания пьезоэлемент сопряжён с прозрачной средой.

Акустооптические модуляторы бегущей волны отличаются от модуляторов стоячей волны по функции и устройству. В них используется бегущая акустическая волна, в которой решётка упругих напряжений в прозрачной среде не «мерцает» на месте, а движется со скоростью звука. Если амплитуда волны постоянна, то дифрагировавший световой пучок также будет иметь постоянную амплитуду, однако за счёт эффекта Доплера его *частота* будет отличаться от частоты исходного света на величину, равную частоте акустической волны. Осуществляя в дальнейшем интерференцию (смещение) световых пучков, дифрагировавших в разных порядках<sup>15</sup>, либо каких-нибудь других пучков, когерентных с ними, можно получить оптическое *гетеродинирование*, причём в качестве промежуточной частоты выступает частота акустической волны, и использовать его для чувствительного анализа амплитуды и фазы одного из пучков. У немонахроматического света, например, света импульсного лазера, такой частотный сдвиг будет действовать на каждую гармонику, причём согласованно по фазе, так что возможность гетеродинирования имеется и для пучков, спектр которых много шире частоты модуляции.

Другое применение акустооптических модуляторов бегущей волны осно-

---

<sup>14</sup>Подобно плоской дифракционной решётке, плоская акустическая волна имеет свой *угол блеска* — направление падения света, при котором дифракция наиболее эффективна.

<sup>15</sup>Чаще всего 0 и 1.

вано на модуляции *амплитуды акустической волны*. При этом дифракционная эффективность также модулируется, что даёт возможность модулировать амплитуду дифрагировавшего (или прошедшего в нулевом порядке) *света* по произвольному временному закону. По сравнению с электрооптическими модуляторами, акустооптические могут иметь меньшую толщину прозрачной среды, что используется для модуляции коротких импульсов (например, прореживания последовательности импульсов, генерируемой титан-сапфировым лазером с самосинхронизацией мод), подверженных в протяжённых средах влиянию дисперсии.

Быстродействие таких устройств ограничено двумя факторами: возможностями модуляции собственно акустической волны и временем прохождения фронта волны через поперечник светового пучка. Оба этих ограничения отодвигаются при помощи повышения несущей частоты акустического сигнала — во-первых, большая абсолютная спектральная ширина модулированной волны на фоне высокой частоты несущей оказывается относительно невелика, что облегчает электрическое и акустическое согласование пьезопреобразователя, а во-вторых, угол дифракции на короткой волне больше, что позволяет туже сфокусировать пучок без опасности перекрытия соседних порядков дифракции, уменьшив таким образом его поперечник. На практике аккуратное применение этих мер позволяет создать модулятор, способный вырезать одиночные импульсы из последовательности с частотой 80 МГц, каковые устройства и предлагаются в качестве дополнительной принадлежности к титан-сапфировому лазеру изготовителями последних.

Акустооптическим модуляторам бегущей волны присуща внутренняя *задержка*, обусловленная распространением акустической волны в толще прозрачной среды между пьезопреобразователем и рабочей областью. При сантиметровых размерах модулятора эта задержка составляет многие микросекунды и может доставить проблемы при использовании модулятора внутри петли обратной связи (используемой, например, для быстрого автоматического регулирования интенсивности пучка), снижая устойчивость её работы.

### 2.3.5 Маршрутизация

Сложные оптические схемы, связанные с коррелированной обработкой двух и более световых потоков, от бинокля до голографического интерферометра, обычно содержат множества плоских зеркал, призм и просто «пустых» участков пространства, на первый взгляд лишь усложняющих оптическую схему. Однако они решают важную задачу: транслируют семантически связанные изображения разными пространственными путями, но подобным образом. В схеме нашего стенда эта задача возникает прежде всего при временных измерениях с использованием двух (или более) пучков, таких как различные разновидности четырёхволнового смешения. Для её успешного решения схема должна с(ов)мещать пучки относительно друг друга с, вообще говоря,

близкой к идеальной точностью, то есть чтобы квантовые состояния фотонов были заданным образом связанными (например, одинаковыми). В идеале они должны иметь неразличимые квантовые числа (волновой вектор и/или пространственное распределение в зависимости от системы мод, в которой производится рассмотрение, а также поляризацию), тогда появляется возможность извлекать фазовую информацию из результатов интерференции двух (или более) пучков.

Для достижения управляемого и согласованного распространения пучков приходится подстраивать элементы, обеспечивающие маршрутизацию. Чаще всего в качестве таких элементов выступают зеркала, смонтированные на двухкоординатных угловых подвижках, снабжённых микрометрическими винтами для точного позиционирования. На первый взгляд, такое зеркало способно управлять лишь угловыми координатами светового пучка, однако по мере распространения последнего приращение угла превращается в приращение координаты, равное произведению углового приращения на пройденное расстояние. Таким образом, всего два таких зеркала, расположенные на расстоянии друг от друга, способны управлять лучом по всем четырём координатам, то есть, вообще говоря, завести луч в любую заданную точку пространства с любого желаемого направления. Однако во многих частных случаях это оказывается неудобным по техническим причинам, таким как ограничение луча оправками, пересечение габаритов подвижек и/или других элементов, отражение от зеркала под неудобным углом, плохая независимость подвижек<sup>16</sup> и т. д., поэтому приходится использовать дополнительные зеркала.

Кроме того, если луч имеет поперечную структуру (например, несёт изображение), то появляются дополнительные координаты (например, поворот вокруг оптической оси), для управления которыми использование дополнительных элементов становится обязательным. Следует отметить, что изображение при каждом отражении от плоского зеркала *зеркально* переворачивается, так что в некоторых случаях приходится использовать дополнительное зеркало просто для достижения нужной чётности числа последних.

Весьма удобно осуществлять все манипуляции с пучками в пределах одной плоскости, расположенной горизонтально над поверхностью опорной плиты. Поскольку уравнения электромагнитного поля линейны, пересекающиеся пучки не влияют друг на друга, поэтому топологических проблем такая маршрутизация не вызывает. Технически же это даёт преимущества как с практической (все элементы смонтированы на держателях одинаковой высоты, так что переставить их из одного места оптической схемы в другое не составляет особого труда), так и с методической (использование всего двух координат при расчётах и естественное соответствие оптической схе-

---

<sup>16</sup>Строго говоря, плохоопределённая матрица, связывающая желаемые четыре координаты луча с положением четырёх органов управления подвижками.

мы плоскому чертежу) точек зрения. При достаточной жёсткости плиты и держателей оптики, а также надёжности их соединения (для чего в плите имеются прорезы или резьбовые отверстия, а держатели снабжены болтами или прижимными скобами) такие оптические схемы, будучи достаточно легко модифицируемыми, могут, тем не менее, не уступать по стабильности специализированным конструкциям из инваровых стержней, применяющимся в законченных оптических приборах вроде лазеров или интерферометров.

Кроме того, маршрутизация в пространстве (с изменением высоты луча над опорной плитой) применяется для сочленения различных участков оптических схем, которые не могут быть соединены непосредственно из-за габаритных ограничений, например, для направления света, отражённого или излучённого образцом, в монохроматор промышленного изготовления, имеющий вполне определённую высоту оптической оси над основанием прибора.

### 2.3.6 Линии задержки

Важной разновидностью маршрутизации следует считать схему, при которой изменяется только *длина* оптического пути, а поперечные и угловые параметры пучка по мере возможности сохраняются. Отдавая должное фундаментальному соотношению

$$L = cT, \quad (2.1)$$

где  $L$  — длина,  $T$  — время, а  $c$  — скорость света, такие устройства называются *оптическими линиями задержки* по аналогии с радиотехническими элементами, выполняющими соответствующую функцию.

Простейшей линией задержки служит одиночное плоское зеркало, перемещающееся параллельно. Отметим, что оптическую роль играет лишь компонента перемещения, перпендикулярная поверхности зеркала. У такого зеркала есть недостаток: при отличном от нормального падении луча света проявляется боковое смещение последнего в плоскости падения, а при нормальном падении входной и выходной пучок занимают одну и ту же область пространства и могут мешать друг другу. Тем не менее, подвижное одиночное зеркало широко используется для регулировки длины оптического пути, особенно в схемах резонаторов, где совпадение падающего и отражённого лучей не представляет проблемы. Благодаря жёсткости и компактности конструкции такую линию задержки удобно применять для тонкой подстройки и/или модуляции *фазы* оптических колебаний достаточно узкополосного света путём субмикронного перемещения зеркала посредством пьезоэлемента.

Для более длинных задержек широко применяются подвижные трёхзеркальные  $90^\circ$ -ные уголкового отражатели (Trippelspiegel, retroreflector), представляющие собой вершину куба, составленную из плоских зеркал. Каждое зеркало при отражении от него светового луча обращает знак компоненты волнового вектора, нормальной к поверхности зеркала. Поскольку взаимно

перпендикулярные зеркала задают декартову систему координат с линейно независимыми осями, последовательное отражение от трёх зеркал полностью обращает волновой вектор луча, то есть отражённый луч распространяется в направлении, обратном падающему, независимо от угла падения на зеркала<sup>17</sup>. Тем самым, угловые характеристики луча не зависят от точности поддержания углового положения отражателя, и последний можно перемещать на значительные расстояния (существенно превышающие длину когерентности всех видов исследуемого излучения).

Угловой отражатель автоматически поддерживает лишь *направление* отражённого луча, а его пространственное *положение* определяется прицельным параметром — расстоянием, на котором падающий луч проходит от вершины куба. Отражённый луч идёт на таком же расстоянии, но с противоположной стороны. Если по условиям эксперимента требуется сохранить поперечные координаты луча в процессе сканирования, то задача возлагается на механизм перемещения отражателя, содержащий для этой цели массивную каретку, прецизионные направляющие, микрометрический ходовой винт, калиброванные шарики и т. д. При этом требуется дополнительная юстировка, направленная на то, чтобы обеспечить параллельность оптической оси луча и траектории механического перемещения вершины отражателя<sup>18</sup>. Поскольку геометрические погрешности механизма, вообще говоря, пропорциональны его размерам, использование линий задержки существенно бóльших габаритов (с бóльшим диапазоном сканирования), нежели требуется по условиям эксперимента, неоправдано.

Конструктивно угловой отражатель выполняется либо в виде единого полированного стеклянного блока в форме трёхгранной пирамиды с усечёнными углами при основании, работающего по принципу полного внутреннего отражения, либо (в случаях, когда прохождение света через толщу стекла нежелательно, например, по соображениям дисперсии) в виде трёх отдельных зеркал с внешним отражением (многослойных или металлизированных), прочно соединённых между собой при помощи клея, оптического контакта или другим способом, обеспечивающим хорошую точность установки и поддержания углов между соединяемыми деталями.

Для использования линии задержки в качестве элемента развёртки автоматизированного измерительного комплекса, ходовой винт снабжается моторным приводом, как правило, в виде *шагового электродвигателя* с редуктором, согласующим шаг винта, шаг двигателя и требуемую точность (дискретность) сканирования. Возможно также применение других типов двигателей, однако это требует наличия датчика положения каретки того или

---

<sup>17</sup> Лишь бы луч не вышел за пределы рабочей апертуры до того, как совершит все три отражения.

<sup>18</sup> Отметим, что расходящийся (например, по причине дифракции) пучок содержит в себе лучи разных направлений, так что точное сохранение *всех* пространственных характеристик света при сканировании с помощью ретрорефлектора невозможно.



иного вида (опорный канал в экспериментальной оптической схеме, реохордный резистивный датчик на каретке, энкодер на валу двигателя и т. п.). Следует отметить, что шаговый двигатель — *относительный* прибор, то есть непосредственно генерирует лишь приращения координаты, так что даже при использовании шагового двигателя остаётся необходимость независимого датчика положения, который в этом случае вырождается в концевой выключатель, дискретную щелевую оптопару или ещё какую-нибудь простую деталь, генерирующую логический сигнал при достижении подвижной кареткой определённого, обычно крайнего, положения с точностью не хуже одного-двух шагов двигателя.

## Глава 3

# Образец

Для продуктивного исследования физических процессов в образце необходимо, чтобы последний находился в стабильных и контролируемых условиях окружающей среды. Структуры на основе арсенида галлия довольно стойки к химическим воздействиям обычной лабораторной атмосферы[14], поэтому основной фактор, нуждающийся в контроле — это температура. Для регулирования и стабилизации температуры в широких пределах, включающих и наиболее интересную область (десятки кельвинов) чаще всего применяются гелиевые криостаты, поскольку гелий — единственный теплоноситель, не замерзающий при низких температурах. При не слишком высоких давлениях гелий подвижен вплоть до абсолютного нуля. Для физических измерений криостаты снабжаются оптическими окнами, электрическими вводами, электромагнитами, механическими манипуляторами и прочими средствами связи образца с внешними факторами, способными передавать то или иное физическое воздействие, но при этом сохранять хорошую теплоизоляцию. Последнее требование приводит зачастую к весьма изощрённым конструктивным ухищрениям.

Условно можно поделить гелиевые криостаты на два класса: конвективные, в которых образец находится непосредственно в потоке (ванне) теплоносителя и кондуктивные, в которых образец смонтирован на поверхности массивного теплообменника, передающего тепло между образцом и теплоносителем. Первые гибче в применении, позволяют осуществлять доступ к образцу с любых сторон, отводить от него значительную мощность и т. д.<sup>1</sup>, однако им свойственны неизбежные потери гелия при эксплуатации, поскольку необходимость смены образца диктует открытость гелиевой полости. Разумеется, применяются всевозможные шлюзы, системы сбора и сжатия отработанного гелия и прочие меры, однако они приводят лишь к уменьшению потерь гелия

---

<sup>1</sup>Разумеется, оптические исследования можно проводить лишь в пределах, обусловленных прозрачностью теплоносителя; впрочем, гелий прозрачен в весьма разнообразных условиях: на практике серьёзные трудности встречаются лишь в диапазоне температур 2.2–4.2 К, когда жидкий гелий способен кипеть и свет сильно рассеивается пузырьками пара.

ценою довольно серьёзных затрат.

В кондуктивных же криостатах образец находится, как правило, в вакууме. Это та же самая вакуумная полость, которая служит для теплоизоляции холодных частей собственно криостата, так что таким образом можно сэкономить одно, а то и два оптических окна на пути света к образцу (или от него). Однако наличие массивного теплообменника, как правило медного, в хорошем тепловом контакте с образцом затрудняет исследование на просвет и некоторые другие виды экспериментов.

### 3.1 Криостат замкнутого цикла

Весьма удобны для рутинных исследований так называемые криостаты *замкнутого цикла*, в которых гелий движется в системе труб, теплообменников и поршневых машин, герметически отделённой от окружающей атмосферы; таким образом практически исключаются как потери собственно гелия, так и загрязнение его примесями посторонних веществ. В лаборатории имеется два таких криостата, изготовленные разными производителями, но близкие по техническим характеристикам и эксплуатационным особенностям. Оба они работают по циклу Жиффорда—мак-Магона[21], питаются сжатым гелием от отдельностоящих компрессоров<sup>2</sup>, охлаждаемых потоком водопроводной воды, содержат две ступени охлаждения, соединённые по газовому потоку параллельно, а по тепловому — последовательно, и обеспечивают минимальную температуру образца примерно 8 К.

По конструкции криостаты представляют собой неразборную холодильную головку, содержащую собственно цилиндры обеих поршневых машин, теплообменники и газораспределительный механизм с приводом от низкооборотного синхронного электродвигателя, на которую надевается вакуумный кожух с оптическими окнами. Головка соединена с компрессором двумя гибкими металлическими шлангами, позволяющими удобно расположить и развернуть криостат и в известной степени демпфирующими вибрацию, создаваемую мотором компрессора. К промежуточному теплообменнику между ступенями криостата, охлаждающемуся при работе примерно до 30–40 К, четырьмя винтами крепится полированный алюминиевый экран, закрывающий всю низкотемпературную ступень, включая теплообменник с образцедержателем, и ограждающий её таким образом от потока теплового излучения кожуха, находящегося при комнатной температуре. Напротив оптических окон кожуха экран имеет соответствующие прорези. В части кожуха, наиболее удалённой от холодного конца криостата, имеются дополнительные окна, частично занятые вакуумным краном и герметичными электроразъёмами, часть контактов которых используется для доступа к термодатчикам, входя-

---

<sup>2</sup>Каждый компрессор снабжён соответствующими фильтрами, электрическими предохранителями, служебными вентилями и манометрами для оперативного обслуживания.

щим в штатный комплект криостата, а остальные могут быть использованы для электрической связи с образцом, измерения вакуума и других лабораторных или экспериментальных целей; остальные же окна заглушены. Кроме того, имеется возможность заменить некоторые оптические окна полированными алюминиевыми заглушками с целью уменьшения лучистого теплового потока из помещения внутрь криостата. Образец крепится к рабочей поверхности теплообменника через медный держатель, позволяющий задать требуемое положение образца относительно окон и даже смонтировать в непосредственной близости от образца оптические или электрические элементы небольших габаритов.

Поскольку все уплотнения либо неразборные, либо работают при комнатной температуре, эти криостаты весьма устойчивы к утечкам. Принцип работы поршневых машин с электроприводом позволяет управлять криостатом при помощи единственной кнопки включения/выключения компрессора; следует лишь помнить о необходимости водяного охлаждения последнего при работе<sup>3</sup> и следить за исправностью электрических соединений между компрессором и головкой. При снятии кожуха и/или экрана (например, для смены образца) становятся доступны цилиндры, которые требуют аккуратного обращения: во-первых, их поверхность отполирована (для отражения теплопритока излучением) и боится загрязнений, а во-вторых, стенки цилиндров очень тонкие (для уменьшения кондуктивных теплопотерь вдоль цилиндра) и могут быть повреждены неосторожным соприкосновением с твёрдыми предметами (инструментом и т. п.). Рекомендуется перед сменой образца или другой подобной работой надёжно закрепить криостат за неразборную часть головки в удобном для работы положении. При сборке кожуха необходимо особо следить за чистотой и правильным расположением вакуумных прокладок и поверхностей, к которым они прижимаются — это поможет избежать трудоёмкой процедуры поиска течей. Разумеется, при работе криостат также должен быть хорошо закреплён, часто для этого используется та часть кожуха, в которой расположены оптические окна, хотя это и приводит к смещениям образца относительно остальных оптических элементов, вызванным температурными и механическими упругими деформациями цилиндров криоголовки при её работе.

## 3.2 Вакуумирование

Лучшей изоляцией от конвективного теплообмена служит вакуум. Теплопроводность сильно разреженного газа (когда длина свободного пробега молекул много меньше расстояния между теплообменивающимися поверхностями) пропорциональна его концентрации (давлению), поэтому для нормальной

---

<sup>3</sup>Хотя в компрессоре и имеется защитная блокировка от перегрева, полагаться только на неё не стоит.

работы криостата и достижения низких температур приходится откачивать воздух, попадающий в полость кожуха при смене образца, а также различные газы, выделяемые находящимися внутри поверхностями и материалами. Давление откачки желательнее поддерживать не выше величины, при которой конвективная теплопроводность не превышает радиационную и кондуктивную. Предварительная откачка осуществляется отдельным насосом [22], как правило, двухступенчатым, подключаемым к криостату через вакуумный вентиль при помощи гибкого стального шланга. Вентиль, шланг и насос снабжены стандартными вакуумными быстроразъёмными соединителями ДУ-16 и/или ДУ-25, что допускает взаимозаменяемость насосов и шлангов. Наиболее удобны турбомолекулярные насосы, имеющие небольшую массу (вплоть до портативных моделей, одна из которых активно используется в лаборатории) и не требующие для работы подготовительных манипуляций вроде прогрева, заправки и т.п., свойственных диффузионным или адсорбционным насосам. Для контроля работы насоса, правильности сборки криостата можно пользоваться тепловыми (термопарными или Пирани<sup>4</sup>) или магниторазрядными вакуумметрами, однако при должной аккуратности необходимость этого возникает редко; если насос вышел на рабочий режим, значит, скорее всего, с вакуумом всё в порядке и через полчаса-час можно начинать захлаживание криостата. Следует помнить, что практически все типы вакуумных насосов весьма негативно относятся к резким изменениям давления откачиваемых газов и могут выйти из строя при, например, открывании вентиля, соединяющего откачанный шланг с атмосферой.

Криогенные устройства с вакуумной теплоизоляцией, включая и гелиевые криостаты, обладают свойством *самооткачки*. Находящиеся в вакуумной полости остаточные газы конденсируются на холодных поверхностях (работающих наподобие крионасосов), что приводит к улучшению вакуума по мере охлаждения криостата. Однако откачивающая способность такого импровизированного крионасоса ограничена, поэтому предварительная откачка внешним насосом и отсутствие существенных течей и прочих источников газа требуются в любом случае. Более того, поскольку в кондуктивном криостате образец находится в наиболее хорошо охлаждаемой части криостата, часть газов осаждаётся прямо на исследуемой поверхности, формируя слой инея, препятствующий некоторым видам оптических экспериментов. Для устранения инея образец приходится быстро нагревать до температуры  $\approx 200$  К, при которой осевшие газы испаряются и поглощаются более холодными частями криостата, а также внешним насосом, если он ещё не отключен к этому време-

---

<sup>4</sup>Импровизированный вакуумметр Пирани можно изготовить из лампы накаливания с вольфрамовой нитью, нарушив герметичность её стеклянного баллона и смонтировав его прямо внутри вакуумной полости. Такой вакуумметр не имеет абсолютной калибровки и подвержен деградации при неаккуратном использовании, однако вполне годится для экспресс-оценки общего состояния вакуумной системы и даже для относительных количественных измерений.

ни. Поскольку нагревается не вся конструкция криостата, а лишь малая часть (теплообменник с образцедержателем), дальнейшее охлаждение до рабочего состояния требует сравнительно малых затрат времени и /или теплоносителя.

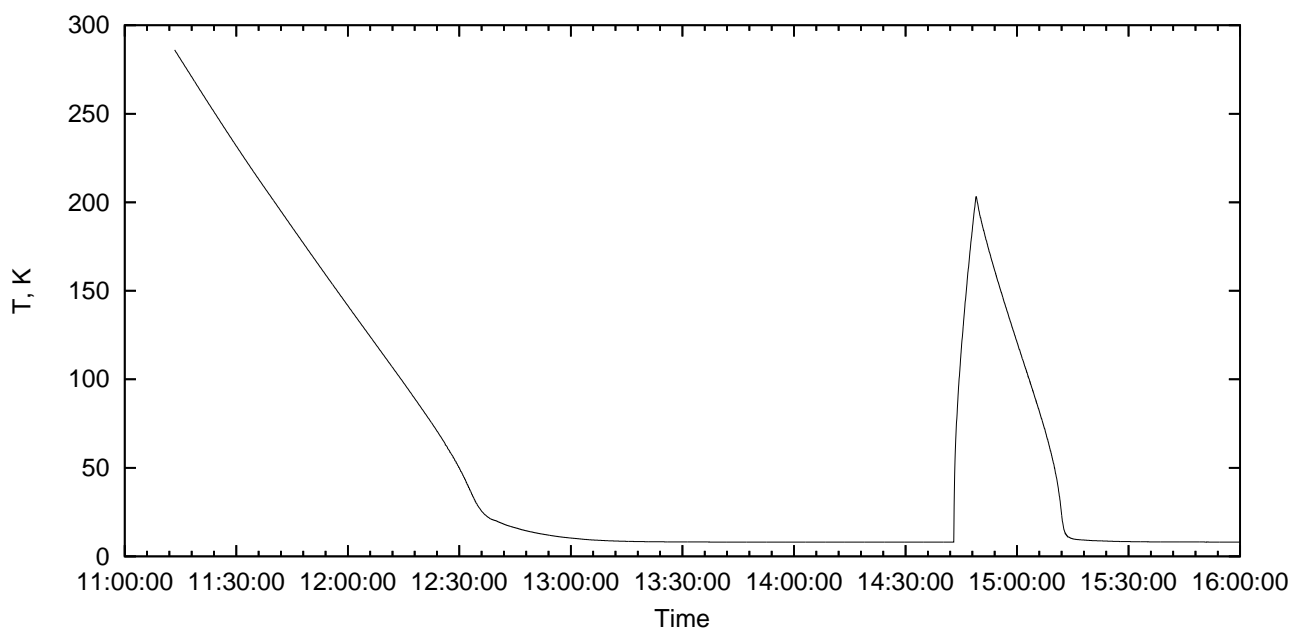


Рис. 3.1: Температурный профиль охлаждения криостата Cryomech ST15 с образцом. Отдельно видны затраты времени на первоначальное захлаживание (с начала графика) и на дегазацию образца (пик в районе 15 часов).

### 3.3 Термостатирование

Сам по себе криостат — это всего лишь устройство охлаждения, откачивающее тепло от образца. Будучи предоставленным самому себе, он в конце концов достигает минимальной температуры образца. Для некоторых экспериментов (например, связанных с оценкой неоднородного уширения) это вполне приемлемо, однако во множестве ситуаций требуется поддерживать контролируемую и регулируемую в известных пределах температуру. Для этого, как правило, используются электронные блоки термостатирования — контроллеры, а внутри криостата, в хорошем тепловом контакте с образцом, располагаются температурный датчик (например, в виде полупроводникового диода: при смещении диода небольшим постоянным током в прямом направлении падение напряжения на нём приблизительно линейно уменьшается в зависимости от температуры в широком диапазоне, от криогенных температур до

комнатной<sup>5</sup>) и омический электронагреватель.

Контроллер состоит из двух функциональных частей: измерителя и управляющей схемы с исполнительской частью. Измеритель осуществляет питание температурного датчика стабильным током, точно измеряет падение напряжения на нём (во избежание погрешностей, связанных с сопротивлением проводов, используется четырёхпроводная схема подключения, что позволяет применять тонкие провода с малой теплопроводностью) и пересчитывает его в значение температуры согласно калибровочной характеристике датчика. Внутри каждого контроллера запрограммирована калибровочная характеристика конкретного экземпляра датчика, поэтому для точного измерения и регулирования температуры тот или иной контроллер должен работать со своим криостатом. Как правило, при включении в сеть контроллер по умолчанию работает в режиме термометра, а исполнительская часть (в том числе нагреватель) выключена. Текущее значение температуры обычно постоянно (за исключением режимов программирования) показывается цифровым индикатором на передней панели контроллера.

Управляющая схема температурного контроллера — это классический одноканальный автоматический регулятор[23]. Традиционно такие регуляторы работают по PID (пропорционально-интегрирующе-дифференцирующему) алгоритму, сводящему всё многообразие свойств регулируемой системы всего к трём параметрам (коэффициент передачи, скорость отклика и время памяти), однако его применение в криостате имеет свою специфику. Дело в том, что параметры регулируемой системы (физически это прежде всего теплоёмкость, а с алгоритмической точки зрения — оба инерционных параметра) существенно меняются в рабочем диапазоне температур, поэтому закон регулирования, оптимально работающий, скажем, вблизи 100 К, может давать излишне большое время установления при 20 К, а при 10 К вообще приводить к автоколебаниям. Кроме того, холодопроизводительность криостата и, следовательно, требуемая для устойчивого регулирования мощность нагревателя, существенно уменьшается по мере приближения к минимальной температуре. Впрочем, последнее неудобство до некоторой степени нивелируется квадратичностью передаточной характеристики омического нагревателя (зависимости выделяемой мощности от проходящего тока), которая приводит к уменьшению коэффициента передачи системы при уменьшении температу-

---

<sup>5</sup>Абсолютное же *приращение* напряжения  $U$  на диоде при заданном относительном приращении тока  $I$  строго пропорционально абсолютной температуре  $T$ :

$$\Delta U = \frac{kT}{e} \log \frac{I + \Delta I}{I}, \quad (3.1)$$

где  $e$  — заряд электрона, а  $k$  — постоянная Больцмана. К сожалению, уравнение (3.1) справедливо лишь для идеального диода с постоянной по площади высотой барьера, нулевым сопротивлением обкладок и т. д., а реальные диоды подчиняются этому соотношению лишь в ограниченной области температур.

ры.

Для обхода этих трудностей температурные контроллеры гелиевых криостатов снабжены дополнительными возможностями, отсутствующими у стандартных контроллеров промышленного назначения. В них программируются разные наборы коэффициентов для различных участков температурного диапазона и/или имеется режим самообучения, при котором контроллер периодически вносит небольшие изменения в заданную уставку температуры, отслеживает реакцию системы и подбирает коэффициенты так, чтобы эта реакция была оптимальной по тому или иному критерию (например, минимальное время установления температуры в заданных пределах вокруг значения уставки). Разумеется, стандартные функции температурных контроллеров, такие как ручные режимы установки коэффициентов, также доступны. Выходной параметр исполнительной части (ток через нагреватель) индицируется на передней панели столбиком светодиодов, что позволяет с одного взгляда оценивать устойчивость стабилизации температуры, наличие аварийных режимов и т. п.

Как и у большинства микропроцессорных приборов, у температурных контроллеров имеются стандартные интерфейсы (RS-232 и/или GPIB), с помощью которых их можно включать в состав автоматизированного измерительного комплекса под управлением компьютера. Протокол обмена у каждого контроллера свой и описан в документации производителя (или не описан, как для некоторых новых приборов с USB-интерфейсом; такие приборы, как правило, непригодны для построения автоматизированных комплексов).



## Глава 4

# Исследование света

После взаимодействия с образцом свет исследуется с целью определения характеристик последнего. В принципе, можно исследовать и другие параметры образца, например, электрические (что и производится многими исследователями, особенно изучающими свойства толстых структур, создающими фотодетекторы и т. п.), однако идеология конструирования оптического вычислительного элемента органически сочетается именно со световыми зондами, к тому же последние дают более разнообразную информацию, в частности, способны предоставить временное или спектральное разрешение, недостижимое другими методами.

### 4.1 Анализ поляризации

Для анализа поляризации света используются в точности те же поляризационные элементы, что и для приготовления света в заданном поляризационном состоянии, часто в «обратном» ходе лучей (см. § 2.3.3). Следует помнить, что паразитные пучки (проникающие, например, через «болтающийся в воздухе» второй канал поляризационного светоделителя) способны принести ровно такой же вред, как и на этапе приготовления света, однако имеют существенно меньшую интенсивность и их, тем самым, сложнее заметить при помощи стандартных средств анализа пространственного распределения света, описанных в § 2.2.1.

Для спектральных измерений, как правило, используется монохроматор с дифракционной решёткой. Последняя представляет собой сильно анизотропный элемент по отношению к поляризации света. В то время как свет, поляризованный вдоль штрихов, отражается согласно геометрической и дифракционной оптике, вторая компонента, с поляризацией поперёк штрихов, испытывает сильное рассеяние в поверхностные моды колебаний электронов металла, из которого сделано зеркальное покрытие решётки. В частности, если на плоскую решётку падает параллельный пучок света, то поглощение  $S$ -поляризации резко возрастает для тех длин волн и углов падения, для

которых один из порядков дифракции направлен строго вдоль поверхности. Иными словами, наклонная дифракционная решётка работает поляризационным фильтром, причём степень поляризации сильно и нерегулярно зависит от длины волны, на которую настроен монохроматор. Проще всего обойти связанные с этим эффектом трудности, если поставить перед входной щелью поляризатор, полностью отфильтровывающий из измеряемого света компоненту, поляризованную поперёк штрихов решётки<sup>1</sup>.

## 4.2 Пространственная фильтрация

Кроме описанных в § 2.3.2 фильтров, чувствительных к спектральному составу и поляризации света, существует ещё один класс — *пространственные* фильтры, которые выполняют аналогичные функции по отношению к пространственному распределению. Последнее характеризуется как координатными параметрами, так и угловыми, соответственно пространственные фильтры можно подразделить на два класса.

*Координатные* фильтры имеют явно выраженную плоскость, в координатах которой нормируются их оптические свойства, чаще всего коэффициент пропускания (хотя бывают и фазовые фильтры), для света, распространяющегося перпендикулярно этой плоскости. Наиболее распространены фильтры с П-образной характеристикой, то есть пропускающие свет в некоторой области вокруг условного центра фильтра и полностью поглощающие (отражающие, рассеивающие) свет, попадающий на периферию. Для одной координаты такие фильтры изготавливают в виде *щели*, а для двух — *диафрагмы*. В рабочей области такие фильтры имеют открытое отверстие, то есть 100% пропускание, а металл, из которого сделана поглощающая часть, практически непрозрачен. Однокоординатная природа щели позволяет регулировать её величину путём механического раздвижения непрозрачных острых губок с точностью, сравнимой с длиной волны видимого света. Однако требования точности накладывают определённые ограничения на материал губок и технологию его обработки (как правило, это шлифованная сталь), так что такие щели довольно сильно рассеивают свет, не попадающий в область пропускания. Традиционно вся конструкция щели располагается по одну сторону опорной плоскости, что упрощает визуальную (или с помощью камеры с объективом) юстировку: плоская поверхность губок служит рассеивающим экраном, естественно расположенным как раз в нужной плоскости. Диафрагмы тоже бывают регулируемые (ирисовой конструкции), однако со значительно меньшей точностью, порядка долей миллиметра, так что при необходимо-

---

<sup>1</sup>В тех применениях, где дорог каждый процент общего коэффициента пропускания, например, в спектроскопии комбинационного рассеяния, иногда применяют другой подход: установку на входе спектрографа *деполяризатора* — кварцевого клина, перемешивающего поляризации близких пространственных и/или спектральных мод.

сти точной фильтрации (например, внутри лазерного резонатора) приходится применять сменные диафрагмы. Диафрагмы для работы в прямоугольных координатах имеют прямоугольное (чаще всего квадратное) рабочее отверстие, а в полярных — круглое. Щели тоже не всегда бывают прямолинейные, так, в светосильных монохроматорах применяются щели в виде кругового сегмента, расположенного вдоль линии минимума того или иного вида аберраций изображения.

*Угловые* пространственные фильтры по своей функции аналогичны координатным за исключением того, что работают в угловых координатах. Для *параксиальных* световых пучков (то есть таких, в которых направление распространения всех лучей близко к некоторому среднему направлению, называемому *оптической осью*) угол распространения света пропорционален поперечной составляющей волнового вектора<sup>2</sup>, и переход между угловыми  $\vec{k}$  и пространственными  $\vec{x}$  координатами происходит путём обычного двумерного преобразования Фурье

$$\tilde{F}(\vec{k}) = \iint F(\vec{x}) e^{i\vec{k}\cdot\vec{x}} d\vec{x}. \quad (4.1)$$

Как уже упоминалось во Введении (§ 1.1.2), такое преобразование можно делать чисто оптическим способом — при помощи линзы (объектива) и участка пустого пространства длиной, равной фокусному расстоянию линзы. Собственно, угловые пространственные фильтры и выполняются в виде сочетания объектива и расположенной в его фокальной плоскости диафрагмы (а также, возможно, второго точно такого же объектива, симметрично расположенного по другую сторону диафрагмы, если требуется восстановить исходное угловое распределение профильтрованного света).

Объективы бывают как одно- и многолинзовые, так и зеркальные. Зеркальные объективы лишены некоторых видов аберраций, например, *хроматизма*, то есть зависимости фокусного расстояния от длины волны, однако имеют одно существенное неудобство: отражённый свет фокусируется в той же области пространства, которую занимает падающий луч, что затрудняет расположение других элементов оптической схемы, особенно если их габариты сравнимы с размерами зеркала. Многолинзовые объективы, благодаря большому количеству степеней свободы (кривизн, толщин и взаимного расположения линз из материалов с различными преломляющими свойствами), тоже можно скорректировать с целью уменьшения тех или иных аберраций, в частности и хроматизма, однако такая коррекция всегда работает лишь в заранее заданном диапазоне параметров, поэтому, например, не стоит ожидать от объектива со скорректированным в видимой области спектра хроматизмом ахроматической работы в ближней инфракрасной области.

---

<sup>2</sup>Собственно, именно этим и определяются границы применимости параксиального рассмотрения: когда синус, тангенс и сам угол между лучом и осью равны друг другу с допустимой точностью.

## 4.3 Монохроматор

Основным прибором, используемым для спектрального анализа света, служит монохроматор МДР-23. Он собран по схеме Фасти и содержит два одинаковых зеркальных объектива, плоскую дифракционную решётку и небольшие вспомогательные плоские зеркала, направляющие сфокусированные лучи на ту или иную из имеющихся в приборе трёх щелей. Иными словами, монохроматор работает по принципу двух угловых пространственных фильтров, связанных между собой дифракционной решёткой.

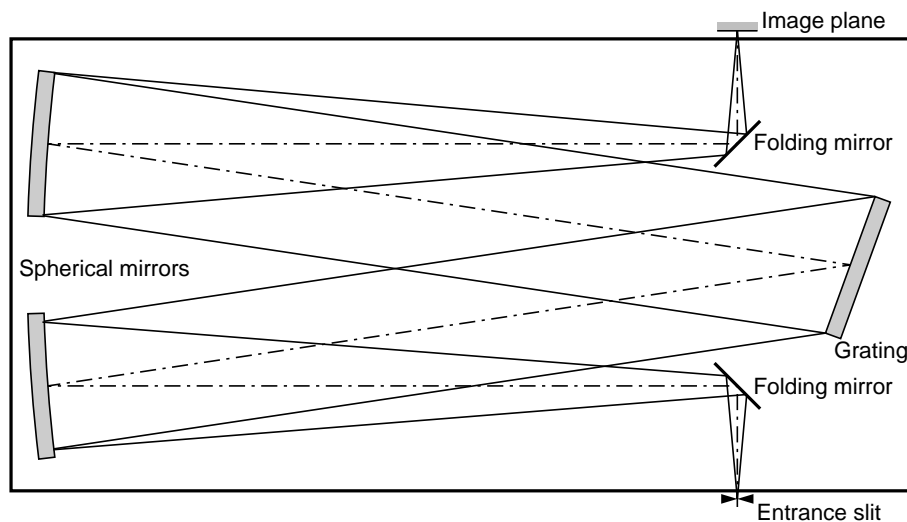


Рис. 4.1: Распространение света определённой длины волны в монохроматоре-спектрографе горизонтальной симметричной схемы Фасти.

Все детали оптической схемы монохроматора надёжно закреплены на массивном основании из литой стали, которое обеспечивает поддержание их взаимного положения с точностью, соответствующей точности их изготовления. Решётка (в комплект монохроматора входит несколько сменных решёток для работы в разных областях спектра) смонтирована в легкосъёмной раме, которая устанавливается на поворотной турели, снабжённой *синусным приводом* от шагового электродвигателя с редуктором. Синусный механизм обеспечивает пропорциональность синуса угла поворота решётки (а, стало быть, длины волны дифрагировавшего света, которая приблизительно равна полуцелому числу постоянных решётки, умноженному на этот самый синус) углу поворота шагового двигателя. С валом двигателя через дополнительный вывод редуктора связана механическая цифровая шкала, отградуированная в длинах волн<sup>3</sup> и электрический контакт-прерыватель, так называемый «репер», который исходно задумывался как источник шкалы длин волн при записи

<sup>3</sup>В некоторых монохроматорах, особенно предназначенных для спектроскопии комбинационного рассеяния, используется *косекансный* механизм, который обеспечивает обратную пропорциональность между указанными углами, так что шкала оказывается отградуированной в обратных единицах, пропорциональных *энергии* фотона.

спектров при помощи неавтоматизированных самописцев, а в компьютеризованном измерительном комплексе его можно использовать для независимого контроля вращения редуктора. Двигатель питается от стандартного (или самодельного нестандартного) источника питания, обеспечивающего ручное управление и/или связь с управляющим компьютером. Регулировка ширины всех щелей осуществляется вручную, независимо друг от друга, что позволяет использовать монохроматор для решения широкого класса задач, в отличие от специализированных приборов с нерегулируемыми или автоматически регулируемыми по раз и навсегда определённым законам щелями.

## 4.4 Детектирование

Детектирование света, прошедшего через анализаторы и/или фильтры, то есть преобразование его в удобную для дальнейшей обработки форму (чаще всего электрический сигнал) осуществляется отдельным узлом — фотодетектором. Они могут основываться на самых различных физических принципах, но в наших исследованиях применяются в основном три типа, свойства которых наиболее полно соответствуют специфике измерений (ближний ИК диапазон спектра, большой требуемый динамический диапазон и т.д.), подробно рассмотренные ниже в этом разделе.

Следует отметить, что все эти типы с точки зрения теории обработки сигналов являются идеальными квадратичными детекторами: выходной сигнал (ток, заряд, частота) пропорционален интенсивности световой волны, то есть *квадрату* её амплитуды. Это ужесточает требования к динамическому диапазону фотодетекторов, но зато позволяет использовать их в качестве смесителей в когерентных экспериментах, таких как оптическое гетеродинирование, интерферометрия и т. д.

### 4.4.1 Фотодиод

Кремниевый фотодиод можно считать наиболее совершенным (в смысле изящества конструкции и принципов действия; разумеется, с прикладной точки зрения каждый прибор может быть совершенен лишь в своей области применимости) фотоприёмником в видимом и ближнем инфракрасном спектральном диапазоне. При должном просветлении входной поверхности коэффициент поглощения приближается к единице, а правильно подобранная внутренняя структура (так называемая р-і-п, с достаточно толстым, порядка длины поглощения света, нелегированным слоем чистого кремния) позволяет собрать подавляющее большинство фоторождённых носителей. К тому же толстый изолирующий слой уменьшает электрическую ёмкость между обкладками диода, что повышает его быстродействие как измерительного прибора. Достаточно большая ширина запрещённой зоны по сравнению с комнатной

температурой (1.22 и 0.025 эВ соответственно) приводит к тому, что характеристики диода слабо зависят от температуры, для большинства применений кремниевые диоды не нуждаются в термостатировании. Единственный конструкционный недостаток диодов большой площади — это необходимость подавать на них свет со стороны одного из электродов, который для этой цели должен быть прозрачным. Обычно его делают либо из прозрачного проводника, такого, как ИТО (смешанный оксид олова и индия, восстановленный до определённой степени окисления; в этом полупроводнике, с одной стороны, достаточно широкая запрещённая зона, чтобы видимый свет не поглощался межзонными переходами, а с другой стороны, достаточно низкая концентрация свободных носителей, чтобы их *плазменная частота* приходилась на средний инфракрасный диапазон), либо из металлической сетки, напылённой в вакууме, либо (для диодов сравнительно небольшой площади или не предназначенных для работы с сильными и/или быстроменяющимися световыми потоками) из тонкого слоя сильнолегированного кремния с кольцевым металлическим контактом вокруг чувствительной площадки. Всё это приводит к некоторой неоднородности чувствительности по площади фотодиода.

В применении кремниевый диод тоже весьма удобен. Для извлечения фоторождённых носителей на него подаётся электрическое смещение в весьма удобном для схемотехники диапазоне (обычно от единиц до десятков вольт)<sup>4</sup>, ёмкость диода достаточно мала, для небольших диодов она меньше, чем межэлектродные ёмкости следующих за диодом в тракте сигнала усилительных элементов, а темновой ток хорошего диода настолько мал, что его измерение требует изрядных усилий. Сигнал в виде постоянного тока предполагает широкий динамический диапазон измерений, и действительно, в подходящих условиях хороший кремниевый p-i-n диод способен уверенно детектировать весьма малые изменения светового потока, фактически, точность измерения можно довести до предела, обусловленного дробовым шумом (квантовой природой света). Этот предел весьма низок, так, фототок величиною 1 мА при времени накопления 1 с имеет среднеквадратичное отклонение порядка  $10^{-11}$  А, то есть  $10^{-8}$  от средней величины, и такие относительные изменения светового потока действительно можно зарегистрировать при помощи известных методик, таких как балансное мостовое включение (см. ниже) или двойное синхронное детектирование, описанное в § 5.2.

Разумеется, для этого необходимо, чтобы электрическая схема, обрабатывающая фототок, сама бы не вносила погрешностей, существенно превышающих указанный уровень. Одним из способов облегчить достижение такого условия является *балансный* детектор, содержащий два фотодиода, включённых в (полу)мостовую схему так, что их фототоки вычитаются. При этом

---

<sup>4</sup>Хотя встречаются и применения, в которых напряжение смещения фотодиода близко к нулю или даже имеет противоположный знак; в последнем случае диод отдаёт электрическую энергию во внешнюю цепь и не требует источника питания, а его электрический режим называется генераторным (photovoltaic).

экспериментатору остаётся лишь направить на фотодиоды такие световые потоки, в которых бы исследуемый сигнал менялся противофазно, а помехи (например, вызванные флуктуациями интенсивности источника света) — синфазно. При точном балансе средних фототоков в измерительном плече моста получается чистый сигнал, правда, с добавлением дробового шума обоих диодов, который всего лишь в  $\sqrt{2}$  раз больше, чем был бы шум одного диода с суммарным фототоком. Такую пару световых потоков удобно создавать при помощи светоделителя, например, поляризационного, если исследуемый параметр влияет на поляризацию света. Фактически, пара фотодиодов, смонтированных на одном основании со светоделительным кубиком и включённых в полумостовую схему — стандартный прибор, имеющийся в лаборатории в нескольких экземплярах.

Для измерения очень малых световых потоков иногда используют *лавинный* режим работы диода, при котором смещение столь велико, что электрическое поле в *i*-области успевает разогнать фоторожждённые носители до энергии, превышающей энергию ионизации, давая им возможность создать дополнительные электронно-дырочные пары. В некотором диапазоне параметров количество рассеянных носителей недостаточно, чтобы вызвать самоподдерживающуюся лавину, и таким образом диод усиливает фототок (и, разумеется, темновой ток тоже). Однако коэффициент усиления очень сильно зависит от величины электрического поля, температуры и локальных параметров кремния, так что лавинный фотодиод требует особой аккуратности при изготовлении (строгая однородность свойств кремния в рабочей области, наличие охранных колец, препятствующих проникновению в неё носителей с богатой дефектами периферии кристалла и т. д.) и всё равно достаточно капризен в применении: требует обязательного термостатирования, а также подвержен нелинейности, вызванной экранированием электрического поля носителями при большой их концентрации. Как уже вскользь упоминалось ранее, подобных недостатков лишены приборы, в которых электроны распространяются в вакууме.

#### 4.4.2 Фотоэлектронный умножитель

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), так же как и описанный в конце предыдущего параграфа лавинный фотодиод, является прибором с лавинным усилением фототока. Однако по конструкции он представляет собой многоэлектродную вакуумную лампу, в которой различные функции выполняются различными частями. Поглощение света происходит на *фотокатод*е, работающем по принципу внешнего фотоэффекта, при котором поглощение кванта света в веществе фотокатода вызывает испускание электрона в вакуум<sup>5</sup>. Фотокатоды бывают плёночными (работающими «на прострел», когда

---

<sup>5</sup>Поскольку дырок в вакууме не бывает, точнее, создание такой дырки (позитрона) требует энергии, далеко превосходящей квант видимого света, фото*аноды* с внешним фо-

электрон испускается со стороны, противоположной той, откуда падает свет) и массивными (работающими «на отражение», на них свет падает со стороны вакуума). Для того, чтобы свет попал на фотокатод, ФЭУ снабжается прозрачным окном. Плёночные катоды напыляются на внутреннюю поверхность окна в процессе изготовления, обычно после сборки и откачки баллона ФЭУ, а массивные помещаются внутри баллона вблизи окна (и тоже обычно активируются в одном технологическом цикле с откачкой).

Как окно, так и фотокатод могут быть выполнены из различных материалов, что предоставляет весьма широкий выбор различных вариантов спектральной чувствительности ФЭУ. Например, ФЭУ может быть чувствительным к ультрафиолету, но практически совершенно не реагировать на видимый свет, или наоборот, хорошо чувствовать видимую область, но не пропускать ультрафиолет. Для наших экспериментов наилучшими фотокатодами, разумеется, служат  $A^{III}B^V$  гетероструктуры, модифицированные с целью облегчения выхода электронов в вакуум (иногда они так и называются «катодами с отрицательной работой выхода»). Грубо говоря, энергия поглощённого фотона расходуется не на выталкивание электрона в вакуум, а на преодоление внутреннего потенциального барьера, что приводит к весьма большому значению квантового выхода, сравнимому с квантовым выходом внутреннего фотоэффекта. Очевидно, такие катоды сложно изготовить *in situ*, так что они бывают только массивными.

Попавшие в вакуум электроны можно ускорять и фокусировать электрическими полями. Располагая вблизи фотокатода фокусирующие электроды и подавая на них соответствующие потенциалы, можно собрать электроны с весьма значительной площади. Фотоумножители, пожалуй, можно считать рекордсменами среди фотодетекторов по размерам фоточувствительной площади. Так, в экспериментах по ядерной физике и физике элементарных частиц используются фотоумножители с катодами в форме полусферы диаметром в десятки сантиметров, способные, например, собрать из кубических километров воды существенную долю света, образующегося там в результате редких ядерных реакций.

После фокусировки электроны попадают в умножительную систему, состоящую, как правило, из большого количества (порядка 10) *динодов*, находящихся под последовательно увеличивающимся потенциалом. Попав на динод, разогнанный электрическим полем электрон выбивает несколько вторичных электронов, которые ускоряются по направлению к следующему диноду и т. д., ток при этом лавинообразно растёт. В конце концов все электроны лавины собираются на аноде, который имеет электрический вывод для подключения измерительной схемы.

Коэффициент умножения определяется произведением коэффициентов вторичной эмиссии динодов, тем самым он экспоненциально зависит от количества фотоэлектронов, которые в природе не встречаются.



чества динодов, и почти экспоненциально (как высокая степень) — от коэффициента вторичной эмиссии одного динода. Коэффициент усиления хорошего ФЭУ может достигать 6–7 десятичных порядков, так что шумы последующей схемы можно не принимать во внимание, главной составляющей шума является дробовой шум детектируемого света. Процессу вторичной электронной эмиссии также свойствен дробовой шум, поэтому ради уменьшения статистического разброса общего коэффициента умножения ФЭУ для разных фотоэлектронов коэффициент эмиссии первого динода стараются сделать побольше (подбирая материал с малой работой выхода и оптимальную энергию падающих на него фотоэлектронов), а усиление последних динодов обычно умеренное, во избежание помех от так называемых *ионных актов*, вызванных движением во встречном направлении атомов остаточных газов, ионизированных электронной лавиной — аналога самовозбуждения многокаскадного усилителя. При грамотном распределении потенциалов на динодах каждый фотоэлектрон вызывает на аноде так называемый *одноэлектронный* импульс заряда, имеющий более-менее постоянную амплитуду, существенно отличающуюся от амплитуды импульсов, вызванных всеми другими причинами (ионные акты, электронная эмиссия динодов и пр.) кроме темнового тока фотокатода.

Благодаря большому коэффициенту усиления ФЭУ прежде всего подходят для измерения очень слабых световых потоков на фоне темноты. Одним из основных режимов работы ФЭУ является режим *счёта фотонов*, когда каждый одноэлектронный импульс (соответствующий почти каждому поглощённому фотону) считается по отдельности. В зависимости от задач эксперимента можно считать среднюю частоту импульсов (эта методика, собственно, и породила в своё время термин «счёт фотонов»), а можно измерять их распределение по времени и корреляцию с другими событиями различной природы, например, фотонами, детектируемыми другим ФЭУ в соседнем плече экспериментальной установки. Благодаря тому, что процесс умножения протекает быстро, ФЭУ имеют неплохое разрешение по времени, от единиц наносекунд в общем случае до десятков пикосекунд при использовании ФЭУ специальной конструкции, оптимизированных для временных измерений.

Поскольку управление движением электронов в вакууме осуществляется несильными электрическими полями, ФЭУ традиционной конструкции чувствительны к магнитным полям, и при экспериментах, связанных с использованием магнитного поля, требуют принятия специальных мер (помещения ФЭУ в ферромагнитный экран, удаления его от источника магнитного поля и т. п.). Иногда для обхода этого недостатка применяют так называемые *микрочанальные ФЭУ*, в которых вместо дискретной системы динодов примеряется нетолстая стеклянная пластина, пронизанная матрицей микронных каналов, внутренняя поверхность которых слабо проводит электрический ток и имеет достаточно большой коэффициент вторичной электронной эмиссии, что достигается путём должного выбора состава стекла и химической обработ-

ки его поверхности после формирования пластины с каналами. При подаче на противоположные стороны пластины достаточной разности потенциалов попавший в канал электрон вызывает лавину точно так же, как и в системе дискретных динодов, а благодаря большому количеству каналов «соседние» (то есть поступившие за время, меньшее времени восстановления распределения потенциала вдоль канала после прохождения лавины) электроны не мешают друг другу. Коэффициент усиления одной пластины меньше, чем хорошо рассчитанной системы дискретных динодов, так что обычно используется две-три таких пластины, расположенных вплотную и с наклонными по отношению друг к другу осями каналов (для подавления сквозного пролёта ионов). Катод и анод в микроканальных ФЭУ также имеют форму плоскостей, расположенных в непосредственной близости от усиливающих пластин. Поскольку траектории электронов в таких ФЭУ весьма короткие, а фокусировка отсутствует, они малочувствительны к магнитным полям. Вдобавок у них, как правило, небольшие габариты, а также имеется возможность (при сегментированной или иной позиционно-чувствительной конструкции анода) анализа изображения.

Так как разности потенциалов между усиливающими элементами (динодами или канальными пластинами) складываются в одном направлении, все ФЭУ требуют высоковольтного (обычно единицы киловольт) источника питания. Более того, поскольку коэффициент вторичной эмиссии зависит от энергии падающих электронов (т. е. от напряжения между усиливающим динодом и предыдущим электродом), к этому источнику предъявляются весьма строгие требования по стабильности напряжения: изменение напряжения питания вдвое вызывает изменение усиления (чувствительности) ФЭУ на несколько порядков. Этим свойством иногда пользуются в специализированных установках для автоматической регулировки усиления. Задача стабилизации напряжения питания ФЭУ несколько облегчается тем, что сам ФЭУ практически не потребляет тока (весь суммарный ток катода и динодов уходит в анод, то есть в измрительную цепь, а ей вполне достаточно наноампер, в крайнем случае микроампер), так что от источника питания требуется лишь мощность, достаточная для питания схемы распределения потенциалов между электродами ФЭУ, которая чаще всего выполняется в виде обычного делителя напряжения из довольно высокоомных резисторов. Сигнальный ток, протекая через эти резисторы, вызывает дополнительное падение напряжения, которое искажает распределение потенциалов между электродами и ограничивает сверху динамический диапазон *выходного* сигнала. В некоторых приложениях эту проблему обходят, уменьшая динамическое сопротивление последних ступеней делителя путём шунтирования резисторов конденсаторами (что годится только для импульсных схем с достаточно редкими импульсами, в промежутках между которыми успевает восстановиться распределение потенциалов) или заменой их нелинейными полупроводниковыми элементами (варисторами, стабилитронами или транзисторами).

Зарядовый (токовый) характер выходного сигнала, появляющегося на аноде — небольшой металлической детали, находящейся в вакууме — даёт весьма большую свободу в выборе дальнейших схем и цепей обработки сигналов. В зависимости от задач анод ФЭУ можно нагрузить на высокоомное сопротивление (для аналогового измерения напряжения, вызываемого протеканием анодного тока через это сопротивление), подключить к согласованной коаксиальной линии (для передачи сигнала к громоздким специализированным приборам), к первичной обмотке импульсного трансформатора (что позволяет гальванически развязать цепь питания ФЭУ от измерительной цепи), к специальному усилителю-формирователю импульсов с теми или иными временными характеристиками и так далее. Следует лишь помнить, что оставленный без нагрузки анод принимает потенциал, близкий к потенциалу последнего диода, то есть постепенно заряжает ёмкость подключённого к нему кабеля до напряжения в десятки-сотни вольт, которое может повредить вход измерительного прибора при неосторожном подключении к нему этого кабеля.

### 4.4.3 ПЗС-матрица

Применение телекамер с ПЗС-матрицами для регистрации и анализа двумерного изображения рассматривалось в § 2.2.1.

В фокальной плоскости выходного объектива монохроматора вместо щели можно разместить однокоординатный приёмник изображения на основе ПЗС-матрицы с большим отношением длины чувствительной области к ширине. При этом монохроматор превращается в спектрограф, позволяющий одновременно регистрировать спектральное распределение интенсивности света в некотором участке длин волн (около 10 нм при использовании решётки 1200 штрихов на миллиметр и ПЗС-матрицы с рабочей областью длиной 25 миллиметров), повышая тем самым чувствительность (в идеальном случае, когда отсутствуют дополнительные потери сигнала — во столько раз, во сколько площадь рабочей области матрицы больше площади выходной щели) ценой снижения временного разрешения (для считывания информации с матрицы требуется известное время, порядка долей секунды) и динамического диапазона (как в силу меньшего диапазона собственно элемента матрицы, так и в силу неизбежности одинаковых условий экспозиции всех элементов независимо от интенсивности детектируемого ими света) по сравнению с фотоумножителем и тем более фотодиодом.

В отличие от одноэлементных приёмников, ПЗС-матрица осуществляет сразу две операции: преобразование света в ток и интегрирование этого тока. Иными словами, выходным сигналом матрицы служит *заряд*, накопившийся в светочувствительных ячейках матрицы за время экспозиции. В применяемом у нас типе матриц (так называемые «back-illuminated») нет конструктивного разделения между накапливающими ячейками и механизмом переноса

заряда на выход, иными словами, для приведения матрицы в исходное (разряженное) состояние необходимо осуществить считывание накопленной информации. При этом время экспозиции получается равным интервалу между двумя соседними процедурами считывания<sup>6</sup>. Перед первой рабочей (то есть с заданным/известным временем) экспозицией приходится осуществлять холостое считывание. Такое интегрирующее свойство позволяет в известной степени регулировать чувствительность матрицы при измерении *интенсивности* светового потока, расширяя эффективный динамический диапазон. С верхней стороны он ограничен минимально допустимой экспозицией, равной времени считывания, а с нижней — темновым током ячеек, приводящим к медленному накоплению заряда даже при отсутствии света.

Темновой ток вызван главным образом активационными процессами в примесях и дефектах кремниевого полупроводника (преимущественно на границах), поэтому он приблизительно экспоненциально зависит от температуры. Охлаждая матрицу при помощи термоэлектрического холодильника, удаётся увеличить допустимое время экспозиции во много раз. К сожалению, размещение матрицы в обычной лабораторной атмосфере, содержащей влагу, связано с выпадением при охлаждении слоя росы или инея, который нарушает прозрачность оптического окна корпуса матрицы. До некоторой степени с этим эффектом можно бороться, обдувая окно ламинарным потоком сухого азота из размещённого поблизости сопла: во-первых, содержание влаги в струе существенно меньше, чем в окружающей атмосфере, а во-вторых, поток нагревает окно до существенно большей температуры, нежели поверхность корпуса, на которой смонтирована матрица. Выпускаются матрицы и со встроенным в корпус термоэлектрическим охладителем, которые в значительной мере лишены описанного недостатка, однако они менее доступны по финансовым соображениям.

Другой способ борьбы с темновым током, называемый «surface pinning», заключается в подаче на электроды матрицы таких потенциалов, которые создают в фоточувствительной толще ячеек поля, препятствующие попаданию в область накопления электронов, родившихся в приповерхностном слое, где сосредоточена основная часть дефектов. Такой способ приводит к уменьшению максимального количества электронов, способное накопиться в ячейке, однако это уменьшение (примерно в два раза) с лихвой компенсируется уменьшением темнового тока (в несколько раз).

Наконец, последним средством борьбы с темновым током является его *измерение* (в условиях, аналогичных последующим рабочим измерениям, но при заведомом отсутствии полезного светового сигнала) с последующим вы-

---

<sup>6</sup>Заметим, что хотя минимальное время экспозиции и не может быть короче полной процедуры считывания, дискретность (точность) установки этого времени существенно выше. Все элементы экспонируются на протяжении определённого и одинакового промежутка времени, но для разных элементов эти промежутки не совпадают, а частично перекрываются.

читанием полученных данных из результатов рабочих экспозиций. Таким способом можно учесть лишь *среднее* значение темнового тока, а его статистические флуктуации и прочие нескоррелированные шумы, наоборот, складываются (хоть и некогерентно, то есть как независимые случайные величины). Впрочем, такая методика скорее относится к следующей главе.

## Глава 5

# Обработка сигнала и управление

### 5.1 Контроллер ПЗС-матрицы

Формирование электрических потенциалов, управляющих процессами переноса заряда в матрице, а также преобразование аналогового электрического сигнала в цифровой вид осуществляется специализированным самодельным контроллером[24], спроектированным с учётом соответствия широкой номенклатуре матриц, выпускаемых компанией Hamamatsu Photonics и совместимых между собой по присоединительным размерам и электрическим сигналам. Контроллер содержит в себе аналого-цифровой преобразователь AD7660 и работает по принципу конечного автомата, распределяя интервалы времени между коммутацией управляющих потенциалов на электродах матрицы, аналого-цифровым преобразованием и передачей данных по параллельной шине<sup>1</sup> в компьютер. Во избежание помех, наведённых на аналоговую часть схемы перепадами цифровых сигналов, обработка аналогового сигнала (стробирование, нормирование и аналого-цифровое преобразование) и передача данных разнесены во времени по принципу конвейера.

В журнальной статье[24] контроллер связывается с компьютером непосредственно через параллельный порт, при этом компьютер выполняет роль задатчика временных интервалов, то есть от него требуется возможность работы в реальном времени, чего распространённые операционные системы персональных компьютеров (такие как, например, Linux или Microsoft Windows) предоставить не в состоянии, так что авторами был сконструирован промежуточный управляющий блок на основе микроконтроллера, самостоятельно обеспечивающий управление матрицей и её контроллером и способный

---

<sup>1</sup>Поскольку разрядность шины параллельного равна восьми, а результат преобразования имеет 16 разрядов, передача каждого слова требует двух циклов шины, что удачно сочетается с чётными и нечётными фазами переноса заряда в матрице, а также с двухбайтным режимом EPP работы параллельного порта.

общаться с компьютером при помощи документированного несложного текстового протокола через последовательный порт. При этом роль компьютера сводится к заданию параметров (длительность экспозиции, режим считывания), после чего управляющий блок самостоятельно обрабатывает экспозицию, считывает и запоминает во встроенной памяти данные, которые затем по отдельной команде передаёт компьютеру.

## 5.2 Синхронный детектор

Извлечение полезной информации из результатов измерения всевозможных сигналов — одна из основных задач экспериментальной физики. Существуют различные методологии, базирующиеся главным образом на том, что составляется некая более или менее адекватная модель исследуемого класса объектов, включающая в себя как механизмы (возможно, упрощённые) формирования и детектирования сигналов, так и идеализированные источники различных помех, шумов и погрешностей, не несущих полезной информации, но воздействующих на результат детектирования. Составленную таким образом математическую модель процесса измерения можно проанализировать математическими методами и найти оптимальное (по тому или иному критерию) решение задачи. Сложность процедуры решения напрямую зависит от математических свойств модели, поэтому популярны упрощённые модели, расчёты которых легко понять и произвести. Например, часто предполагается, что измеряемый сигнал линейно зависит от исследуемой величины, а помехи являются независимыми случайными величинами и аддитивно складываются с полезным сигналом. Такая модель позволяет легко применить мощный математический аппарат теории вероятностей и линейной алгебры и получить понятную и полную методику обработки сигнала. Однако не следует забывать, что именно экспериментатор отвечает за адекватность соответствия модели реальному эксперименту. Так, например, при использовании техники счёта фотонов и других методик, в которых основным источником шума являются естественные флуктуации числа зарегистрированных фотонов, статистические свойства шума (который называется в таких случаях *дробовым* шумом) отличаются от вышеописанной общеупотребительной модели: распределение соответствующей случайной величины не является нормальным, его характеристики (дисперсия) зависят от уровня сигнала, так что может быть оправдано использование другой модели, например, метода *наибольшего правдоподобия*, который требует более строгой модели, в частности, полной параметризации исследуемого физического явления, а его реализация связана со значительными затратами вычислительных ресурсов, но зато он корректно работает в условиях практически любых дискретных измерений.

Широкий класс оптимальных методик можно описать при помощи *фильтра Кальмана*[25], простейшей (одномерной) реализацией которого и явля-

ется синхронный детектор. Принцип его работы основан на том, что экспериментатор, как правило, имеет возможность осуществить *модуляцию* исследуемой величины по известному закону, например, заставив её колебаться во времени с некоторой постоянной частотой. После формирования, детектирования и, возможно, усиления сигнала в его составе окажутся различные помехи, но они не будут нести в себе заданной модуляции. Синхронный детектор осуществляет корреляционную обработку сигнала путём сдвига всех частот сигнала на величину частоты модуляции и фильтрации полученного результата при помощи фильтра низких частот. Сдвиг производится при помощи перемножения (аналогового или цифрового) сигнала и *опорной* синусоиды, фаза и частота которой связаны с фазой и частотой модуляции. При этом помехи, отличающиеся по частоте от полезного сигнала, после перемножения будут осциллировать и подавятся фильтром низких частот. В *двухканальном* синхронном детекторе в качестве опорного сигнала используется комплексная синусоида (вещественная и мнимая части которой сдвинуты по фазе на  $\pi/2$ ) и комплексный же перемножитель<sup>2</sup>, что позволяет определить фазу модуляции сигнала относительно опорной фазы, не прибегая к повторным измерениям, а также получить независимую оценку статистических свойств шума при измерениях серий данных (в частности, со сканированием параметров измеряемой системы). Следует помнить, что модуляция, сканирование и работа фильтра низких частот происходят в *одном и том же* реальном времени, так что для адекватной регистрации сигнала требуется соблюдать определённые временные соотношения: вообще говоря, частоту модуляции следует выбирать много больше, чем ширина полосы пропускания фильтра, а скорость сканирования — так, чтобы резкие изменения измеряемой величины не искажались фильтром. Абсолютное же значение полосы пропускания фильтра выбирается исходя из требуемого отношения сигнала к шуму<sup>3</sup>.

Конструктивно применяемые синхронные детекторы обычно содержат, кроме собственно перемножителя и фильтра, усилители (как входного сигнала, так и результата фильтрации), регулятор фазы опорного сигнала, индикатор(ы) величины выходного сигнала и некоторые вспомогательные узлы и схемы. В частности, активно применяются в стенде приборы SR830 (работающий в диапазоне частот модуляции от сверхнизких до 100 кГц) и SR844 (от 25 кГц до 200 МГц) снабжены весьма развитыми входными цепями, позволяющими в некоторых случаях подключать датчики сигнала, такие как фотодиоды или ФЭУ, непосредственно к синхронному детектору, без использования

---

<sup>2</sup>Линейные модели ведут себя совершенно одинаково что с вещественными, что с комплексными величинами, поэтому использование мнимых чисел для описания «реальных» физических величин не должно вызывать смущения, по крайней мере, до тех пор, пока исследуемые процессы подчиняются линейным законам (принципу суперпозиции).

<sup>3</sup>К сожалению, связанное с сужением полосы пропускания увеличение времени накопления сигнала приводит к тому, что большую роль начинают играть низкочастотные компоненты спектра шума, так называемый «дрейф», то есть не любой шум можно эффективно подавить сужением полосы.



дополнительных предусилителей; перемножение и выходная фильтрация осуществляются в цифровом виде (т. е. после аналого-цифрового преобразования), что уменьшает погрешности детектора (прежде всего дрейф выходного сигнала); приборы имеют микропроцессорное управление и стандартные интерфейсы для общения с компьютером, что позволяет передавать туда данные непосредственно в цифровом виде; а также каждый из них содержит встроенный высокостабильный генератор опорной частоты с электрическим выходом и возможностью детектирования на кратных частотах (гармониках).

Поучительным частным случаем применения синхронного детектора служит *двойное* синхронное детектирование, органически связанное с экспериментами, проводимыми по четырёхволновой схеме. Действительно, соотношение, подобное (1.8), справедливо не только для волнового вектора — пространственной вариации фазы, но и для других видов модуляции. Иными словами, если каждый из возбуждающих систему световых пучков  $\vec{k}_1$ ,  $\vec{k}_2$  несёт свою модуляцию, то продукт нелинейного четырёхволнового смешения будет нести их обе сразу. В частности, при синусоидальной модуляции возбуждающих пучков на разных частотах  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  продукт взаимодействия будет промодулирован в том числе и на комбинационных частотах

$$\Omega_1 \pm \Omega_2, \quad (5.1)$$

отсутствующих в модуляции возбуждающего света. Таким образом можно избавиться от помех, вызванных попаданием на детектор рассеянного возбуждающего света.

На практике вместо генерирования отдельного опорного сигнала с одной из частот (5.1) применяют последовательное включение двух синхронных детекторов: первый детектирует на частоте  $\Omega_1$  и имеет полосу пропускания, достаточно широкую для прохождения частоты  $\Omega_2$ . Выходной сигнал первого детектора подвергается обработке вторым на частоте  $\Omega_2$ . При этом детектируются обе частоты (5.1), что улучшает отношение сигнала к шуму. Аккуратное применение такой методики, сочетающее должный выбор частот модуляции  $\Omega_1 \gg \Omega_2$ , предварительную оптическую фильтрацию (пространственную, спектральную и/или поляризационную), препятствующую попаданию на фотодетектор рассеянного возбуждающего света с частотой модуляции  $\Omega_1$ , электронную фильтрацию (при помощи резонансного LC-контура), оставляющую на входе первого синхронного детектора только частоты вблизи  $\Omega_1$ , надлежащее распределение общего коэффициента усиления между входными и выходными усилителями обоих детекторов и тому подобные меры позволяют надёжно детектировать весьма слабые сигналы нелинейного происхождения даже в вырожденных случаях вида  $\vec{k} = \vec{k}_1 + \vec{k}_2 - \vec{k}_1$ .

Другим забавным применением двухканального (то есть с возможностью измерения фазы) синхронного детектора является получение *временной* зависимости периодического сигнала путём независимого измерения амплитуд

и фаз некоторого количества гармоник частоты его повторения с последующим Фурье-синтезом формы сигнала при помощи компьютера. Такой способ уступает прямому измерению с многоканальным накоплением, поскольку в каждый момент времени накапливается не более одного канала, однако может быть использован в условиях, когда прямое измерение по какой-либо причине неосуществимо.

### 5.3 Управление шаговыми двигателями

Различные подвижные элементы станда, такие как каретка линии задержки или решётка монохроматора, используются как задатчики развёртки (по времени и по спектру соответственно). Для их управляемого перемещения дешевле всего применять *шаговые электродвигатели*. С электротехнической точки зрения шаговый двигатель представляет собой конструктивную разновидность *синхронного* мотора, отличающуюся от обычно применяемых в промышленности и бытовой технике очень большим числом полюсов (наиболее распространены 8-, 32-, 60-, 80-, 100- и 180-полюсные двигатели, как правило, с неполным комплектом явно выраженных полюсов на статоре, и полным — на роторе) и необычным числом фаз (в то время как обычные синхронные двигатели бывают однофазными или трёхфазными, шаговые двигатели имеют 2 или 4 фазы, реже 3). Из всех существующих типов синхронных двигателей в качестве шаговых применяется два: статические, в которых магнитное поле создаётся постоянными магнитами, расположенными на роторе, и реактивные, в которых ротор сделан из магнитомягкого материала и намагничивается полем, создаваемым током через обмотку статора. Статические двигатели имеют статический синхронизирующий момент, то есть при отсутствии тока в обмотках ротор удерживается в устойчивом положении, они способны как бы запоминать положение, в котором они находились в момент выключения тока; в реактивных же двигателях при отсутствии тока в обмотках ротор вращается свободно, если не учитывать трение в подшипниках.

Важной особенностью шаговых двигателей является возможность работы в широком диапазоне скоростей, для чего применяется *частотное управление*: скорость вращения определяется частотой тока в обмотках. С целью упрощения схем формирования токов последние обычно зависят от времени не синусоидально, а ступенчато. В связи с этим появляется понятие *шага* как промежутка времени между соседними ступенями, в течение которого ни один из токов не меняется. В зависимости от точности приближения синусоиды ступеньками, один и тот же двигатель может иметь разную величину шага. В простейшем случае ступени имеют всего два уровня (меандр), а токи в противоположных обмотках дополняют друг друга; именно для этих условий традиционно определяется понятие номинального «шага двигателя», которое приводится в технической документации (иногда прямо в обозначении) дви-

гателя и равняется удвоенному числу полюсов. Так, двигатель 2ДШ78-0,16-1 имеет 180 полюсов и его шаг равен  $1^\circ$ , а у ДШИ-200 число полюсов равно 100 и на один оборот приходится 200 шагов. В обоих случаях величина шага отражена последним числом в обозначении, но по-разному. Применяемый в большинстве монохроматоров производства ЛОМО двигатель ШДР-711 даёт 120 шагов на оборот (цифры в обозначении условные). По схеме включения двухфазные статические двигатели имеют либо четыре вывода (по два конца от каждой из двух независимых обмоток), либо шесть (добавляются выводы от середин обмоток), либо восемь (каждая обмотка делится на две независимые полуобмотки), в последних двух случаях их можно питать от стандартных четырёхфазных схем; а четырёхфазные реактивные двигатели имеют либо отдельные выводы от каждого конца каждой обмотки (всего 8), либо один из концов каждой обмотки объединяется с соседними, тогда выводов получается 5. Следует отметить, что в статических двигателях важно соблюдать полярность подключения обмоток с целью согласования направления магнитных полей ротора и статора, а в реактивных двигателях играет роль лишь величина тока в обмотке, а его направление, вообще говоря, несущественно.

В сторону низких частот шаговые двигатели могут быть замедлены неограниченно. Поскольку индуктивное сопротивление обмоток при этом стремится к нулю, схема формирования тока должна обеспечивать стабилизацию последнего. При питании схемы от источника постоянного напряжения это достигается включением последовательно каждой обмотке так называемого «форсировочного» резистора, на котором при этом падает большая часть напряжения питания, либо, если расход мощности на нагрев резисторов нежелателен, ключевого электронного стабилизатора, снабжённого датчиком тока и цепью, возвращающей коммутируемую мощность обратно в источник питания. При повышении же частоты вращения наблюдается два независимых эффекта. Во-первых, индуктивность обмоток конечна, так что для включения, выключения или изменения направления тока требуется время, определяемое отношением этой индуктивности к сопротивлению форсировочного резистора (или произведением индуктивности на величину тока, отнесённым к напряжению питания для ключевой схемы), так что из ступенчатой зависимость тока от времени превращается в трапецеидальную, а затем и в пилообразную. При этом понятие шага теряет свою определённую и работа двигателя приближается к работе обычной синхронной машины с плавным изменением тока в обмотках, за исключением того, что постоянная составляющая этого тока создаёт магнитное поле, тормозящее ротор за счёт потерь, связанных с токами Фуко. Единственный способ обойти, точнее, отодвинуть это явление состоит в повышении напряжения питания (и сопротивления форсировочных резисторов) до величины, допускаемой электропрочностью изоляции обмоток.

Во-вторых, как и любая синхронная машина, шаговый двигатель склонен

к квазиупругим колебаниям ротора вокруг положения равновесия. Резонансная частота этих колебаний определяется моментом инерции ротора (точнее, приведённым моментом всех вращающихся частей механизма с учётом коэффициента передачи редукторов) и *величиной* магнитного поля, и в первом приближении не зависит от частоты тока в обмотках и скорости вращения двигателя. При достаточной амплитуде колебаний (порядка расстояния между соседними полюсами) синхронизирующего момента становится недостаточно для возвращения ротора в устойчивое положение и двигатель *выпадает из синхронизма*. При этом нарушается фазовое соотношение между оборотами ротора и периодами тока в обмотках, то есть происходит пропуск шагов. Как и в любой резонансной системе, в синхронном двигателе можно возбудить как свободные колебания (резким рывком приводимого механизма или изменением частоты тока в обмотках), так и вынужденные (периодическим воздействием, частота которого близка к резонансной). У шагового двигателя есть естественный источник такого воздействия — частота шагов (и её гармоники). Благодаря широкому диапазону рабочих частот, проблема резонанса между частотой шагов и собственными колебаниями часто встречается на практике. Универсального её решения не существует. Однако различные меры, такие как ограничение допустимого диапазона рабочих частот, сокращение времени работы двигателя в резонансной области до величин, при которых колебания не успевают развиться, снижение добротности резонанса при помощи механического или электрического демпфирования, снижение частоты резонанса использованием дополнительного маховика, независимый контроль мгновенной скорости вращения ротора и некоторые другие, будучи применёнными по отдельности или в комплексе, позволяют в большинстве случаев добиться приемлемой работы двигателя. Что касается свободных колебаний, то их влияние отражено в стандартной паспортной характеристике двигателя — «частоте приёмистости». По определению, это такое мгновенное изменение частоты вращения, при котором амплитуды свободных колебаний гарантировано недостаточно для выпадения двигателя из синхронизма в заданных условиях (ток, температура, нагрузка и т.д.). Если частоту перестраивать достаточно плавно, то можно добиться устойчивой работы двигателя в диапазоне, превышающем частоту приёмистости на порядок и более.

Формирование временной последовательности чередования импульсов тока в обмотке осуществляется обычно по одному из двух законов. Во-первых, это равномерное вращение с точно определённой скоростью (как правило, не превосходящей частоты приёмистости). Это приводит к равномерному сканированию управляемой физической величины во времени, что может быть удобно, когда система регистрации сигнала (например, однокоординатный аналоговый самописец) не имеет информационной связи с блоком управления шаговым двигателем, но сама содержит равномерную развёртку по времени. В англоязычной литературе этот режим называется «scan».

Вторая возможность — это сканирование по точкам, когда заранее за-

даётся некий набор точек (положений механизма), а привод максимально быстро переходит из каждой точки в следующую, возможно, задерживаясь там на определённое время, когда это требуется по условиям эксперимента (например, для накопления сигнала). Этот режим требует наличия связи между приводом и управляющей системой (достаточно односторонней связи, когда одна из сторон определяет темп эксперимента и периодически отдаёт команды другой), но зато позволяет гораздо большую гибкость в выборе компромисса между временем, затрачиваемым на проведение эксперимента, и подробностью полученных данных. Такой режим называется «jog». Поскольку быстрое перемещение из точки в точку требует предварительного расчёта траектории из условия прохождения заданного расстояния при непревышении заданного максимального ускорения, необходимо наличие достаточно гибкого алгоритма с переменными параметрами, что проще всего выполнить программным способом.

Таким образом, формирование импульсов можно осуществить либо логической схемой на микросхемах малой степени интеграции, либо однокристалльным микроконтроллером, либо непосредственно компьютером с выводом информации через параллельный порт. В последних двух случаях требуется применение отдельных силовых блоков, содержащих источник питания и преобразующих логические уровни в мощные импульсы тока, а в первом случае силовой блок и логический формирователь обычно совмещены в единую конструкцию. На практике применяются все четыре способа (логические схемы имеются как отдельностоящие, производства ЛОМО, так и модульные, входящие в состав некогда популярной автоматизированной измерительной системы КАМАК), в зависимости от года изготовления и задач того или иного шагового привода.

# Литература

- [1] Feynman R. P., Simulating Physics with Computers // International Journal of Theoretical Physics, **21**, 467–488 (1982).
- [2] Калитеевский Н. И., Волновая оптика, М., 1978.
- [3] Акулин В. М., Карлов Н. В., Интенсивные резонансные взаимодействия в квантовой электронике, М., 1987.
- [4] Герловин И. Я., Когерентная оптическая динамика полупроводниковых гетероструктур, СПб, 2007.
- [5] Benedict M. G., Trifonov E. D., Coherent reflection as superradiation from the boundary of a resonant medium, Phys. Rev. A **38**, 2854–2862 (1988).
- [6] Цифринович В. И., Расчёт сигналов эха, Новосибирск, 1986.
- [7] Кокин А. А., Твердотельные квантовые компьютеры на ядерных спинах, М.—Ижевск, 2004.
- [8] Karlyanskii A. A., Macfarlane R. M. (editors), Spectroscopy of Solids Containing Rare Earth Ions (Volume **21** of Series "Modern Problems in Condensed Matter Sciences"), North-Holland, 1987.
- [9] Citrin D. S., Radiative lifetimes of excitons in quantum wells: Localization and phase-coherence effects, Phys. Rev. B **47**, 3832–3841 (1993).
- [10] Петров В. В., Капитонов Ю. В., Техника молекулярно-лучевой эпитаксии, СПб, 2007.
- [11] Теренин А. Н., Фотоника молекул красителей и родственных органических соединений, Л., 1967.
- [12] Fidler H., Terpstra J., Wiersma D. A., Dynamics of Frenkel excitons in disordered molecular aggregates, The Journal of Chemical Physics, **94**, 6895–6907, 1991.
- [13] Левинштейн М. Е., Симин Г. С., Барьеры, М., 1987.

- [14] Алфёров Ж. И., Двойные гетероструктуры: концепция и применения в физике, электронике и технологии, УФН **172**, 1068–1086 (2002).
- [15] Ubyivovk E., Dolgikh Yu. K., Efimov Yu. P., Eliseev S. A., Gerlovin I. Ya., Ignatiev I. V., Petrov V. V. and Ovsyankin V. V., Spectroscopy of high-energy excitonic states in ultra-thick GaAs quantum wells with a perfect crystal structure, Journal of Luminescence **102–103**, 751–754 (2003).
- [16] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Курс теоретической физики, **3** (Квантовая механика), М., 1963, §22.
- [17] Карлов Н. В., Лекции по квантовой электронике, изд. 2, М., 1988.
- [18] Лебедева В.В., Техника оптической спектроскопии, М., 1977, §7.5.
- [19] Коломийцов Ю. В., Интерферометры, Л., 1976.
- [20] Яковлев П. П., Мешков Б. Б., Проектирование интерференционных покрытий, М., 1987.
- [21] Соколов Е. Я., Бродянский В. М., Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения. М., 1981.
- [22] Розанов Л. Н., Вакуумная техника, изд. 3, М., 2007.
- [23] Винер Н., Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине, М., 1968.
- [24] Полтавцев С. В., Давыдов В. Г., П.з.с.-фотодетектор для оптического спектрометра, Приборы и техника эксперимента, №4, 2006, 158–161.
- [25] Kalman R. E., A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, Transactions of the ASME. Journal of Basic Engineering, **82** (Series D), 35–45 (1960).