

УДК 621.373.826

ПИКОСЕКУНДНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ, УПРАВЛЯЕМЫЙ МИКРО-ЭВМ

А. Ю. Абдуллаев, С. В. Говорков, В. Н. Задков, Г. И. Петров, И. Л. Шумай

(кафедра общей физики и волновых процессов)

Описан универсальный лазерный комплекс для нелинейно-оптической диагностики поверхности полупроводников, автоматизированный на базе аналогового вычислительного комплекса ДВК-2.

Введение. Процессы, происходящие на поверхности полупроводников под действием мощного лазерного излучения, привлекают в последние годы огромный интерес исследователей, что связано с практическими потребностями микроэлектроники. Прогресс в лазерной технике позволил к настоящему моменту использовать для измерений пикосекундные оптические импульсы, длительность которых приближается к характерным временам фотоиндуцированных процессов в полупроводниках. Благодаря этому наиболее эффективным средством изучения быстропротекающих процессов на поверхности полупроводника являются оптические и в первую очередь нелинейно-оптические методы [1], поскольку они непосредственно дают информацию о структуре полупроводника вследствие тензорного характера нелинейных восприимчивостей. К последним относятся генерация второй и третьей гармоник (ГВГ, ГТГ), суммарных частот (ГСЧ) при отражении лазерного излучения от поверхности, а также активная спектроскопия комбинационного рассеяния света (АСКР) [2] в геометрии на отражение.

Уровень лазерного возбуждения легко может достигать порога плавления полупроводника. Это обстоятельство вызывает необходимость тщательного контроля энергии возбуждающих импульсов одновременно с контролем энергий и частот зондирующих импульсов в нескольких каналах измерения и их относительной задержки. В каждой точке необходимо обеспечить статистическую обработку регистрируемого сигнала и оперативный вывод данных на графопостроитель. В процессе эксперимента требуется также перестраивать длины волн зондирующих лазеров и перемещать образец по нескольким координатам. Помимо этого в таких экспериментах необходима быстрая перестройка работы аппаратуры регистрации.

Перечисленные требования составляют специфику нелинейно-оптических пикосекундных экспериментов и определяют необходимость применения для контроля и управления такими экспериментами компьютерных систем сбора и обработки данных.

В данной статье подробно описан универсальный лазерный комплекс для нелинейно-оптической диагностики поверхности полупроводников, автоматизированный на базе микро-ЭВМ. На наш взгляд, такая установка позволяет в полной мере проследить основные принципы построения автоматизированных лазерных комплексов, конкретную реализацию отдельных узлов установки, принципы программного обеспечения на примере получивших в последние годы широкое распространение в лабораторной практике ДВК-2 и аппаратуры сопряжения в стандарте КАМАК.

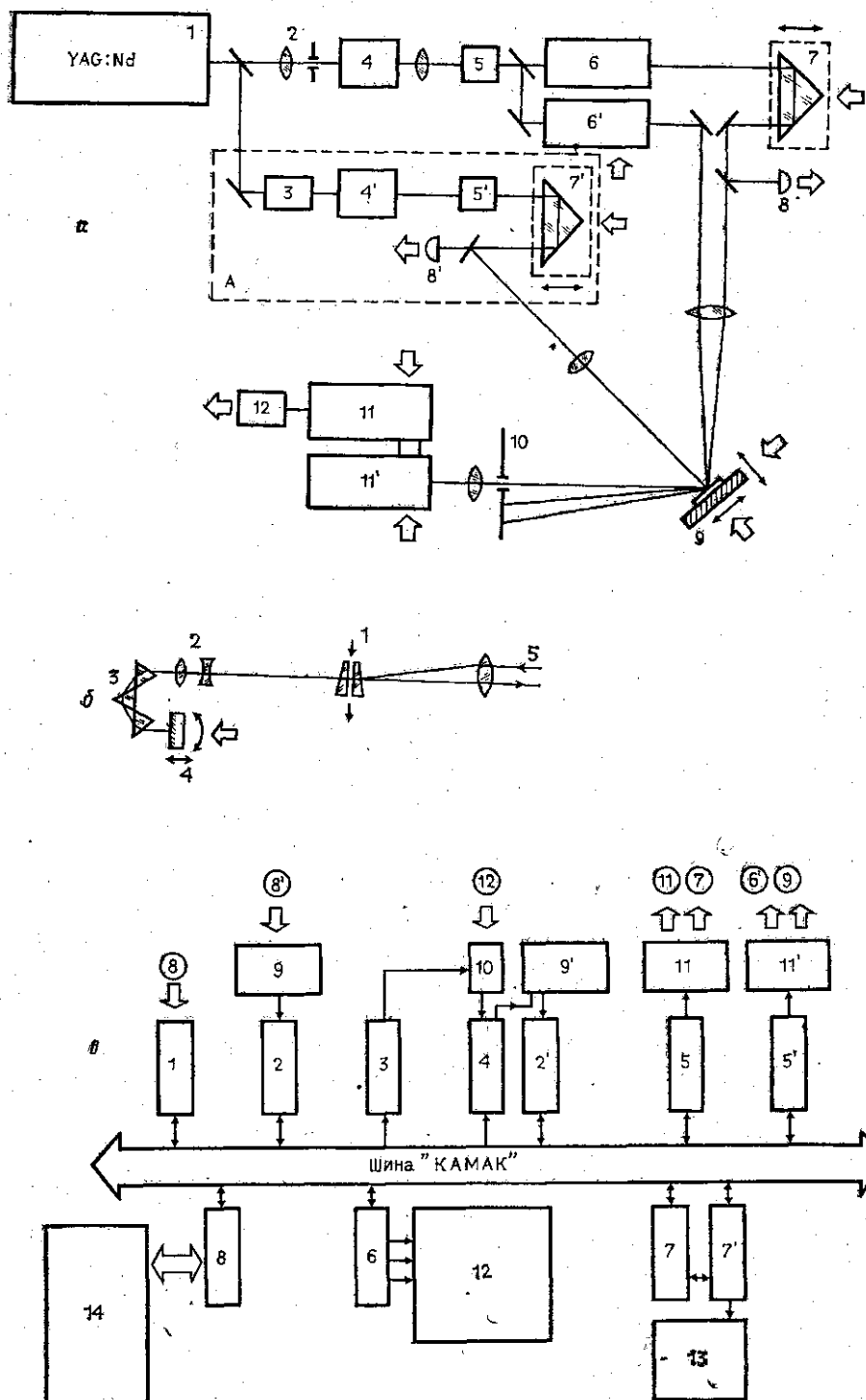


Рис. 1. Схема пикосекундного спектрометра: а — оптическая схема, б — конструкция лазера на растворе органического красителя, в — схема системы регистрации и управления: цифрами в кружках обозначены узлы спектрометра, с которыми осуществляется взаимодействие (нумерация соответствует рисунку 1, а)

Описываемая установка позволила провести целый ряд экспериментов по нелинейно-оптической диагностике поверхности полупроводников [3—6], два из них рассмотрены в данной статье.

Оптическая схема установки. Спектрометр (рис. 1, *а, б*) состоит из комплекса лазеров, формирующего возбуждающее и зондирующее излучения, механизма перемещения и поворота образца, а также системы регистрации и автоматизации.

В качестве задающего генератора используется лазер на кристалле $\text{YAG} : \text{Nd}$ с пассивной синхронизацией мод (1), осуществляемой пленочным затвором с насыщающимся поглотителем (см. рис. 1, *а*). В настоящее время конструкция таких лазеров хорошо отработана [7]. Здесь мы использовали относительно тонкий и короткий активный элемент (4×40 мм) из $\text{YAG} : \text{Nd}$ для уменьшения влияния самофокусировки и термических искажений излучения. Выходным зеркалом служила клиновидная подложка. В качестве расширителя в резонаторе использовалась призма, прижимающая пленку с поглотителем к глухому зеркалу. Лазер генерирует пуг из 5—7 импульсов длительностью 45 пс, энергия пуга около 3 мДж, частота повторения пугов 3 Гц. Излучение задающего лазера после усиления в усилителе 4 (кристалл $\text{YAG} : \text{Nd}$ размером 8×80 мм) удваивается по частоте в кристалле KDP (5) и используется для накачки двух лазеров (6, 6') на растворе органического красителя (ЛРОК) R6G . Пространственный фильтр (2), образованный диафрагмой и линзой, необходим для оптической развязки усилителя и генератора.

В некоторых экспериментах необходимы одиночные пикосекундные импульсы. Тогда используется канал А (см. рис. 1, *а*). Выделение одиночного импульса из пуга происходит в электрооптической ячейке 3, управляемой высоковольтным разрядником. Подробное описание аналогичных систем можно найти в [7]. После усиления (4) и удвоения частоты (5) одиночные импульсы имеют энергию около 1 мДж и длительность 30 пс (длина волны $\lambda = 0,53$ мкм).

Конструкция ЛРОК подробно показана на рис. 1, *б*. Перестраиваемые по частоте пикосекундные импульсы получают методом синхронной накачки [8]. Раствор красителя (R6G в этаноле) прокачивается через клиновидную кювету 1 толщиной около 2 мм, образованную двумя клиновидными подложками. В качестве дисперсионного элемента используется блок из трех призм 3 (стекло ТФ-5) и телескоп 2, увеличивающий угловую дисперсию в 3 раза. Применение такого элемента позволило уменьшить ширину спектра генерируемого излучения до 2 см^{-1} при малом числе обходов резонатора. Перестройка длины волны в диапазоне 0,55—0,59 мкм осуществляется поворотом заднего глухого зеркала 4 при помощи шагового двигателя. Выходным зеркалом служит одна из стенок кюветы, непосредственно соприкасающаяся с красителем. Поступательным перемещением зеркала 4 достигается равенство длин резонаторов задающего генератора и ЛРОК. ЛРОК излучает пуг импульсов с энергией около 0,5 мДж из 3—5 импульсов (5) длительностью 30 пс. Для взаимного временного согласования всех импульсов, генерируемых лазерной системой, используются оптические линии задержки 7 и 7' (см. рис. 1, *а*), управляемые от ЭВМ при помощи шаговых двигателей. Контроль длительности импульсов и их относительного временного положения осуществляется с помощью электрооптической камеры «АГАТ СФ-1». Энергии всех излучений измеряются фотодиодами 8, 8'.

Механическая система 9 позволяет перемещать образец по двум координатам в плоскости среза (пределы перемещения 50×50 мм, по-

ворота — 360°), а также вращать его вокруг нормали к поверхности. Она приводится в движение тремя шаговыми двигателями, управляемыми от ЭВМ.

Система регистрации, состоящая из пространственного фильтра 10, двойного монохроматора, образованного двумя монохроматорами МДР-23 (11, 11'), и фотоумножителя 12, предназначена для выделения оптического сигнала из шумов и его регистрации.

Компьютеризированная система регистрации данных и управления спектрометром. На рис. 1, в приведена блок-схема системы регистрации и управления комплексом, ядром которой является диалоговый вычислительный комплекс ДВК-2. Функции сопряжения компьютера с экспериментальной установкой выполняет в нашем случае аппаратура КАМАК. Ряд сигналов может регистрироваться аппаратурой, выполненной не в стандарте КАМАК; с последующим вводом информации с этих приборов в модули КАМАК.

Так, аналоговые сигналы с фотодиодов и ФЭУ, несущие информацию об оптических импульсах, поступают либо непосредственно на вход блока КАМАК аналого-цифрового преобразователя (АЦП, блок 1), либо на вход стробируемого вольтметра В9-5 (блоки 9, 9' на рис. 1, в). Сигнал с ФЭУ (10) предварительно усиливается в блоке 4 (мы использовали усилитель NL-2208 в стандарте КАМАК с коэффициентом усиления до 2000 и чувствительностью 1 мВ, однако это может быть и автономный усилитель). На выходе вольтметра имеется информация об амплитуде оцифрованных импульсов, которая вводится для последующей обработки в модуль КАМАК входного регистра (блоки 2, 2'). Питание ФЭУ осуществлялось специальным высоковольтным блоком питания 3, выполненным также в стандарте КАМАК.

Управление отдельными узлами установки (перемещение образца по двум поперечным координатам; перестройка двойного монохроматора и длины волны излучения ЛРОК и др.) осуществляется при помощи шаговых двигателей (ШД), управляемых самодельными блоками 11, 11' (см. рис. 1, в). Каждый из блоков управления ШД обеспечивает работу до трех ШД различного типа. Информация для блоков поступает с модулей КАМАК выходного регистра (блоки 5, 5' рис. 1, в), либо задается вручную с автономной панели управления (для наладки комплекса).

Для управления элементами установки комплекса нами был разработан универсальный набор механических юстировочных устройств со встраиваемыми ШД, обеспечивающих различные степени свободы. Из таких узлов, например, собрано многокоординатное устройство 9 (см. рис. 1, а).

Для графического представления результатов мы использовали двухкоординатный самописец Н-306 (12 на рис. 1, в), управляемый модулем 6 (серийный блок МУС) (см. рис. 1, в), и матричный графический принтер «Электроника УВВПЧ-30-004», входящий в состав ДВК-2 (14). Отображение графической информации в реальном времени осуществлялось на экране бытового телевизора (13) при помощи модулей управления «ДИНАМО» в стандарте КАМАК (блоки 7, 7').

Программное обеспечение комплекса. Программное обеспечение (ПО) комплекса построено по иерархическому принципу. Нижний машинно-зависимый уровень составляют программы на языке Ассемблер. Они обеспечивают интерфейс с языком Фортран. Затем идет уровень подпрограмм на языке Фортран, обслуживающих работу отдельных

узлов спектрометра (перестройку ЛРОК, монохроматоров, регистрацию информации и др.). И наконец, программа, управляющая проведением эксперимента. Она задает алгоритм и последовательность работы программ нижних уровней. Объем прикладного ПО составляет около 2,5 тыс. операторов языка Фортран (средний уровень ПО) и 500 команд машинного кода (интерфейсные программы).

Такой подход к организации ПО обеспечивает универсальность программ нижних уровней (изменение основной управляющей программы не приводит к изменению остальных), позволяет существенно повысить эффективность разработки новых программ, сократить время для подготовки нового эксперимента. Отметим, что для экспериментатора наиболее удобным является диалоговый режим работы с управляющей программой.

Весь комплекс программ работает в среде операционной системы реального времени РАФОС (версия однозадачного монитора).

Статистическая обработка сигнала может осуществляться двумя способами: в первом из них регистрируются амплитуды импульсов, поступающих с ФЭУ, и производится их усреднение по заданному количеству импульсов лазера, во втором — производится амплитудная дискриминация импульсов ФЭУ и регистрируется количество импульсов (техника счета фотонов).

Для вывода графической информации на графопостроитель, принтер или телевизионный монитор мы использовали подмножество программ широко распространенного комплекса «Графор».

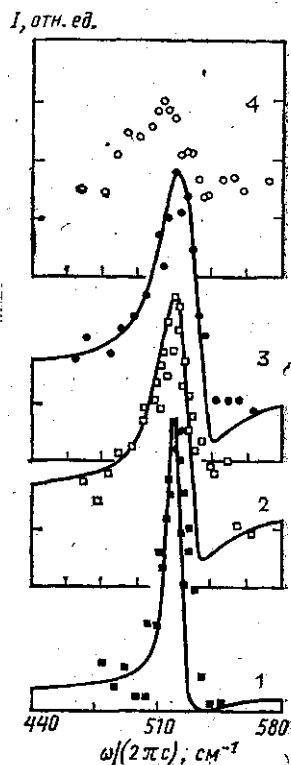
Примеры применения спектрометра. Рассмотрим работу спектрометра на примере двух экспериментов, выполненных недавно в нашей лаборатории: АСКР в кремнии в условиях мощного пикосекундного возбуждения поверхности [6] и исследование аномальной рекристаллизации и аморфизации ионно-имплантированного арсенида галлия под действием пикосекундных импульсов [5].

1. Задачей первого из указанных экспериментов было измерение спектров фоновой моды $\Gamma_{25'}$ в Si с пикосекундным временным разрешением при различных уровнях возбуждения одним из зондирующих излучений. Специфика эксперимента состоит в том, что необходимо, во-первых, контролировать амплитуду возбуждающего импульса с точностью до 10%, и, во-вторых, в каждой новой точке спектра производить статистическую обработку сигнала либо методом усреднения отсчетов по большому числу импульсов, либо, при малом уровне сигнала (при слабом возбуждении), по методу счета фотонов. Практически это осуществлялось следующим образом. Компьютер перестраивал при помощи шаговых двигателей длину волны излучения ЛРОК и, соответственно, монохроматор, после чего начиналось накопление отсчетов в данной точке спектра. При этом учитывались лишь отсчеты, полученные при возбуждающих импульсах с энергией в пределах 10% отклонения от заданной величины. Далее цикл повторялся. В результате были получены спектры при различных энергиях возбуждения (см. рис. 2), причем спектр 1 был снят в режиме счета фотонов, а 2—4 — прямым усреднением отсчетов.

2. Для исследования фазовых переходов в ионно-имплантированном GaAs исследовались одиночные импульсы второй гармоники излучения лазера на YAG: Nd с длительностью 30 пс. Необходимо было установить природу кольцевых структур, образующихся на поверхности GaAs под действием таких импульсов, а также проследить эволюцию этих структур с ростом энергии лазерных импульсов. Рассмотрим работу установки в этом эксперименте. При каждом лазерном импульсе

измерялась энергия E возбуждающего импульса, а также энергии слабого зондирующего импульса (задержанного на 100 пс относительно возбуждающего) и этого же импульса, отраженного от поверхности, благодаря чему мог быть вычислен коэффициент линейного отражения R в центре возбуждаемой области. На графопостроителе выводилась зависимость $R(E)$. После каждого импульса при помощи двухкоординатного устройства 9 (см. рис. 1, а) образец передвигался на новое место последовательно по двум координатам, так что полученные «пятна» образовывали сетку заданных размеров. Впоследствии визуально при помощи микроскопа определялись диаметры рекристаллизованной области (D) и аморфного пятна (D'). Сопоставлением этих данных с записанными значениями E в каждом импульсе были получены зависимости $D(E)$ и $D'(E)$. По резкому скачку $R(E)$ вблизи порога образования кристаллической области был сделан вывод о появлении расплава на поверхности при энергиях E , больших порогового значения E_0 .

Рис. 2. Спектры оптического фонона в Si, определенные при различных энергиях возбуждающих импульсов: $E=0,3E_0$ (1); $0,5E_0$ (2); $0,7E_0$ (3); $\sim E_0$ (4), где E_0 соответствует порогу плавления Si. Сплошные кривые — рассчитанные на ЭВМ спектры [6]



Таким образом, нами описана конструкция, продемонстрированы возможности и прослежены основные принципы работы пикосекундного спектрометра для диагностики поверхности полупроводников.

Авторы благодарны Н. И. Коротееву и В. Н. Марченко за помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ахманов С. А., Емельянов В. И., Коротеев Н. И., Семинов В. Н. // УФН. 1985. 147. С. 675—745. [2] Ахманов С. А., Коротеев Н. И. Методы нелинейной оптики в спектроскопии рассеяния света. М., 1981. [3] Ахманов С. А. и др. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1985. 49. С. 506—515. [4] Говорков С. В., Коротеев Н. И., Шумай И. И. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1986. 50. С. 683—689. [5] Абдуллаев А. Ю. и др. // Письма в ЖТФ. 1986. 12, № 22. С. 1363—1368. [6] Говорков С. В., Задков В. Н., Коротеев Н. И., Шумай И. И. // Письма в ЖЭТФ. 1986. 44. С. 98—100. [7] Данелюс Р. и др. Параметрические генераторы света и пикосекундная спектроскопия. Вильнюс, 1983. [8] Ковригин А. И., Нехаенко В. А., Першин С. М., Подшивалов А. А. // Квант. электр. 1984. 11, № 10. С. 2007—2018.

Поступила в редакцию
29.09.86