

УДК: 531.781.2

Гребенников В.А. **, Куломзин Е.К. *, Львов Б.Г. *, Чердакова Е.Е. *

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

**Московский государственный институт электроники и математики
(технический университет),*

***ОАО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро»*

Приведен способ определения внутренних напряжений в монокристаллических материалах поляризационно-оптическим методом по разности фаз монохроматического светового луча. Разработана принципиальная схема прибора, реализующего способ.

Ключевые слова: остаточные напряжения, деформации, монокристаллические материалы, поляризационно-оптический метод, модуляция сигнала

Введение:

Подробные сведения о распределении внутренних остаточных напряжений в деталях и элементах машин имеют большое значение на всех этапах проектирования оборудования. Именно поэтому задача изучения внутренних остаточных напряжений в монокристаллических подложках, на основе которых создаются все микросхемы, является особенно актуальной.

На современном этапе развития электроники и микроэлектроники особое внимание уделяется подложкам микросхем, которые существенно влияют на надежность функционирования электронных компонентов, работающих в экстремальных условиях (работа в тяжелых и критических режимах, в условиях действия радиации, температуры, электромагнитного излучения и др.). Так, остаточные внутренние напряжения подложек в процессе эксплуатации могут вызвать, например, разрыв дорожек на микросхемах и выход из строя аппаратуры в целом. Именно поэтому задача изучения внутренних остаточных напряжений в монокристаллических пластинах является особенно актуальной.

В настоящий момент большинство приборов работает на элементах, выполненных на подложках из монокристаллического кремния или арсенида галлия. Вследствие механических воздействий на этапе первичной обработки монокристалла, например, резка кристалла на пластины, полировка и т.д., внутри подложек могут образовываться остаточные внутренние напряжения.

Основной причиной появления внутренних напряжений являются скопления дефектов кристаллической решетки: точечных дефектов, дислокаций и дефектов несоответствия. Точечные дефекты появляются еще на этапе кристаллизации, также они могут образовываться в результате тепловой обработки. Точечные дефекты оказывают существенное влияние на скорость диффузии и электропроводность материала. Скопление линейных дефектов – дислокаций – влияет на прочность и пластичность. Дислокации появляются в результате пластической деформации, которая например, при изгибе подложки сопровождается образованием дислокационных стенок – малоугловых границ зерен. Такие дислокационные стенки могут влиять на процессы релаксации напряжений несоответствия в нанесенных на них эпитаксиальных слоях. При росте пленки на подложке несоответствие параметров кристаллических решеток и дефекты несоответствия приводят к упругой деформации пленки, нанесенной на подложку [4].

В качестве аналога предлагаемого способа определения остаточных внутренних напряжений с помощью оптико-поляризационного метода был использован способ измерения остаточных напряжений в полупроводниковых кристаллах по соотношению интенсивностей светового излучения, прошедшего кристалл [1].

В известном способе луч света поляризуют и направляют на образец, после этого измеряется степень эллиптичности светового луча. Вращающийся анализатор преобразует степень эллиптичности в постоянную и переменную составляющие интенсивности луча. По соотношению интенсивностей этих составляющих определяли остаточные напряжения в образце.

Недостатком данного способа является трудоемкость процесса при определении напряжений, которая обусловлена ручным режимом измерения, и недостаточная точность измерений.

В качестве прототипа способа был использован способ определения остаточных напряжений в кристаллах гадолиний-галлиевого граната поляризационно-оптическим методом по разности фаз с помощью лазерного луча [2]. Основным недостатком прототипа является долгая продолжительность измерений. Продолжительность процесса измерения в одной точке составляет несколько десятков секунд. Это обусловлено тем, что исследуемый образец необходимо дискретно перемещать относительно светового луча и для каждой точки вручную изменять подаваемый на кристалл модулятора-компенсатора тестовый сигнал, визуально определяя момент компенсации.

Основным достоинством предлагаемого метода определения остаточных напряжений является повышение точности измерений и снижение трудоемкости измерений как в процессе проведения измерений, так и в процессе обработки полученных результатов. Эти преимущества достигаются тем, что при измерениях практически отсутствуют ручные настройки.

В предлагаемом способе определения остаточных внутренних напряжений используется поляризационно-оптический метод [3] по разности фаз монохроматического светового луча¹. При этом осуществляется оптическая модуляция, формируется частота гармоника модуляции с постоянной и переменной разностью фаз и образующейся при прохождении света через анализируемый монокристалл с наведенной разностью фаз. Далее осуществляется селективное выделение из общего потока светового потока электрического сигнала, соответствующего частоте гармоника модуляции, и последующая регистрация момента компенсации разности фаз по тестовому сигналу. Для синхронного определения момента компенсации разности фаз при

¹ RU 2240501 (C2) Гребенников В.А., Кульбацкий Е.Б., Меженный М.В., Попов Ю.П., Джанджгава Г.И., Ефанов А.А., Способ и установка для определения остаточных напряжений в монокристаллических материалах поляризационно-оптическим методом

последовательном шаговом сканировании анализируемого монокристалла относительно луча света частоту гармоника модуляции плавно модулируют и масштабируют электрическим сигналом низкой частоты. Для этого с помощью блока электронного управления на модулятор подают высокое напряжение низкой частоты с последующей дополнительной фильтрацией выделенного электрического сигнала и его электронной обработкой. Оба сигнала (с селективного усилителя и тестовый сигнал с обмоток тестирования высоковольтного трансформатора низкой частоты), попадающих на входы усилителя считывают в АЦП и анализируют с помощью программного обеспечения. При этом низкочастотный модулирующий сигнал анализируют на минимум по абсолютной величине, а мгновенное значение тестового сигнала анализируют на равенство минимальному значению низкочастотного модулирующего сигнала, отвечающего равенству по абсолютной величине компенсационной и наведенной разности фаз и являющейся функцией остаточных напряжений в кристалле.

На рис.1 приведена принципиальная схема прибора, реализующего способ определения остаточных внутренних напряжений в монокристаллических материалах оптико-поляризационным методом содержит источник излучения, оптико-электрическую систему, образец, связанный с приводом сканирования, анализатор, фотодиод селективного усиления и вычислительное устройство.

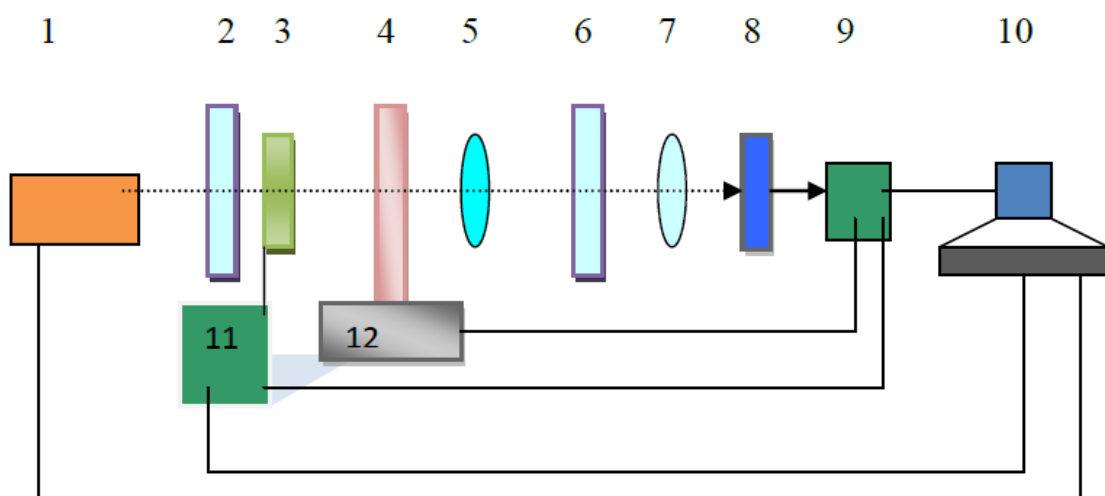


Рис. 1 - Принципиальная схема прибора

- 1- лазер с длиной волны = 1,342 мкм;
- 2 – поляризатор (призма Глана);
- 3 – ячейка Поккельса (на основе кристалла ниобата лития);
- 4 – исследуемый образец (оптически прозрачный монокристалл кремния);
- 5 – микрообъектив;
- 6 - анализатор (призма Глана - Тейлора);
- 7 – фокусирующая линза;
- 8 - фотоприемное устройство (фотодиод на арсениде галлия);
- 9 – АЦП;
- 10 – управляющий компьютер;
- 11 - драйвер ячейки двухполярный (форма импульса модулирующего сигнала – синусоидальная, частота 20 кГц);
- 12 – двух координатный привод сканирования с контроллером.

Предлагаемая последовательность действий при выполнении исследования:

- в держатель устанавливается образец 4 и собранный узел крепится на приводе сканирования 12;

- включается сеть 220/50 и подается питание на входящие устройства: лазер 1, драйвер 11, фотоприемное устройство 8, АЦП 9, управляющий компьютер 10, привод сканирования 12;

- частично поляризованное монохроматическое излучение лазера 1 дополнительно поляризуется поляризатором 2 и модулируется переменным напряжением на ячейке Поккельса 3 с помощью драйвера 11, который формирует двухполярный синусоидальный импульс напряжения, частота модуляции постоянна и равна 20 кГц;

- модулированный луч проходит образец 4, микрообъектив 5, анализатор 6, фокусирующую линзу 7 и поступает на фотодиод 8, который преобразует световой импульс в электрический сигнал;

- полученный сигнал оцифровывается АЦП 9 и данные передаются в управляющий компьютер 10 для обработки;

• в момент достижения сигналом на фотоприемнике максимального значения измеряется величина модулирующего напряжения на ячейке Поккельса;

• значение напряжения используется для проведения последующих расчетов по двум простым формулам:

$$\Delta_0 = - (U_k - U_0) / (U_{\lambda/2} - U_0) \pi \quad (1),$$

где Δ_0 – разность фаз;

U_k – регистрируемый фотоприемником оптический сигнал (напряжение, соответствующее моменту компенсации разности фаз, т.е. при — ;

U_0 – напряжение, при котором наблюдается нулевая разность фаз (т.е. без образца);

$U_{\lambda/2}$ - полуволновое напряжение;

$$\text{—} \quad (2),$$

где — – разность главных напряжений;

— - длина волны используемого света;

$C = 1,71 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{кг}$ - фотоупругая постоянная, зависящая от кристаллографической ориентации исследуемого кристалла относительно луча света;

h - толщина образца.

Заключение:

На сегодняшний день существует множество различных способов определения внутренних остаточных напряжений в монокристаллических материалах. Однако практически все методы являются недостаточно точными, очень трудоемкими, а на исследование одного образца требуется до получаса. Предлагаемый способ измерения внутренних остаточных напряжений поляризационно-оптическим методом позволяет получать точные результаты измерений, не затрачивая при этом много времени на эксперимент и обработку полученных данных.

Литература:

1. Оксанич А.П., Вдовиченко Н.Д. Электронная техника, сер.2 Полупроводниковые приборы, вып.3, 1988 г.
2. Захаров С.Н., Крутогин Д.Г., Пономарев Н.М., Савушкина Н.М., Савушкина Н.И. Разработка метода количественного определения напряжений в пластинах монокристаллов гадолиний-галлиевого граната. В сб.: Исследование процессов получения редких и редкоземельных металлов и их соединений, М.: Гиредмет, 1989
3. Р. Миндлин. Изучение напряжений методом фотоупругости. Успехи физических наук Т. XXIII, вып. 1, Нью-Йорк 1940
4. Овидько И.А., Шейнерман А.Г. Дислокации несоответствия в тонких пленках на пластически деформированных подложках. Физика твердого тела, 2002, том 44, вып. 7