

Применение растровой микроскопии для контроля полупроводниковых структур

Барышников Ф. М., Зайцев А. А., Концевой Ю. А.

Рассмотрены общие принципы растровой электронной микроскопии (РЭМ). Представлены результаты применения РЭМ для исследования дефектов подложек гетероэпитаксиальных структур GaN/Al_2O_3 и пластины SiC. Приведён пример использования рентгеновского микроспектрального анализа для анализа сплава, применяющегося в технологии широкозонных гетеротранзисторов.

Введение

Растровая электронная микроскопия (РЭМ) широко применяется для исследования поверхности и рельефа многих, в том числе полупроводниковых материалов и структур [1-4]. Еще в начале 70-х годов при использовании РЭМ и ионного травления были выявлены включения в германии [4], которые крайне отрицательно влияли на свойства германиевых транзисторов.

Растровый электронный микроскоп (РЭМ) можно эффективно использовать для контроля технологии гетеротранзисторов на широкозонных материалах. По своим техническим возможностям он сочетает в себе качества как светового (СМ), так и просвечивающего электронного (ПЭМ) микроскопов, но является более многофункциональным.

Принципы электронной растровой микроскопии

В основе РЭМ лежат сканирование поверхности образца электронным зондом и детектирование (распознавание) возникающего при этом широкого спектра излучений. Сигналами для получения изображения в РЭМ в основном служат вторичные и отражённые электроны. Другие эффекты, такие как поглощённые электроны, рентгеновское излучение, фотолюминесценция, используются для получения дополнительной информации. Высокая информативность, простота изготовления объектов для исследования, высокая степень автоматизации количественного анализа изображения и обработки результатов измерений и др. делают РЭМ наиболее универсальным прибором для исследования структуры материалов и топографии поверхности.

Важнейшей характеристикой любого РЭМ является его разрешающая способность. Она определяется площадью сечения или диаметром первичного электронного зонда, контрастом, создаваемым образцом и детекторной системой, областью генерации сигнала в образце. Диаметр зонда в основном зависит от конструктивных особенностей и качества узлов микроскопа и прежде всего электронной оптики. В современных РЭМ достигнуто высокое совершенство компонентов конструкции, что позволило уменьшить диаметр зонда до 4...8 нм.

Основной фактор, ограничивающий разрешение, - это протяжённость области генерации сигнала в образце. При проникновении первичных электронов в образец они рассеиваются во всех направлениях, поэтому внутри образца происходит расширение пучка электронов. В рассчитанной с использованием соотношений, приведённых в [5], таблице представлена глубина проникновения электронов для разных элементов при различной первичной энергии луча.

Таблица 1

Пробеги электронов (мкм) через различные материалы
и энергия характеристического рентгеновского излучения $E_{\text{к}\alpha}$, кэВ

Энергия электронов, кэВ	Алмаз	Al	Si	Cr	Ni	Cu	Mo	W	Pt	Au
15	3,51	4,6	5,32	1,72	1,39	0,51	1,21	0,64	0,58	0,64
30	9,12	12	13,8	4,47	3,61	3,24	3,15	1,66	1,5	1,67
50	18,5	24,3	28,0	9,07	7,33	7,29	6,39	3,37	3,04	3,38
70	29,5	38,7	44,7	14,5	11,7	11,7	10,2	5,38	4,85	5,39
100	48,1	63,1	72,9	23,6	19,0	24,8	16,6	8,77	7,91	8,79
$E_{\text{к}\alpha}$, кэВ	0,28	1,49	1,74	5,4	7,5	8,0	17,4	57,9	65,2	67

Боковое расширение электронного пучка в образце в этом случае имеет величину при малых ускоряющих напряжениях порядка нескольких мкм, даже когда зонд имеет диаметр 10 нм. Таким образом, площадь выхода на поверхность образца электронов будет больше или намного больше размера фокуса электронного пучка. В связи с этим процессы рассеивания электронов внутри образца оказывают большое влияние на разрешающую способность изображений.

Отражённые электроны. Размеры области генерации отражённых электронов значительны и зависят от длины пробега электронов в материале образца (табл. 1). Протяжённость области возрастает с увеличением ускоряющего первичные электроны напряжения и уменьшением среднего атомного номера Z элементов, входящих в состав образца. Протяжённость области может изменяться от 0,1 мкм до нескольких мкм. Электроны, потерявшие в процессе отражения часть энергии, покидают образец на относительно больших расстояниях от места падения электронного зонда. Соответственно сечение, с которого получают сигнал, будет существенно больше сечения зонда. Поэтому разрешение РЭМ в режиме регистрации отражённых электронов небольшое и изменяется от десятков нанометров при работе с невысокими ускоряющими напряжениями и тяжёлыми материалами до нескольких микрометров при работе с большими ускоряющими напряжениями и легкими материалами.

Вторичные электроны. Первичные электроны, проникающие в образец, взаимодействуют с электронами внешних оболочек атомов объекта, передавая им часть своей энергии. Происходит ионизация атомов образца, а высвобождающиеся в этом случае электроны могут покинуть образец и быть выявлены в виде вторичных электронов. Они характеризуются очень малой энергией до 50 эВ и поэтому выходят из участков образца, очень близких к поверхности. Глубина слоя, дающего вторичные электроны, составляет 1...10 нм. В пределах этого слоя рассеивание электронов пренебрежимо мало, и поэтому при получении изображений во вторичных электронах разрешающая способность определяется прежде всего диаметром первичного зонда.

Вторичные электроны обеспечивают максимальную в сравнении с другими сигналами разрешающую способность порядка 5...10 нм. Поэтому они являются в РЭМ главным источником информации для получения изображения поверхности объекта, и именно для этого случая приводятся паспортные характеристики прибора. Основным параметром, определяющим выход вторичных электронов, является угол падения пучка первичных электронов на поверхность объекта. Этот эффект используется для получения информации

о топографии поверхности. Большая разрешающая способность РЭМ при работе в режиме регистрации вторичных электронов служит причиной того, что именно этот режим используется при изучении топографии поверхности (топография поверхности транзисторов, поверхности с ямками травления и др.). При этом композиционный контраст проявляется слабо.

Получившие широкое распространение в России растровые электронные микроскопы имеют следующие параметры (табл. 2).

Таблица 2

Параметры растровых микроскопов

Тип РЭМ	JBX-5500FS	JBX-6300FS	FEI Nova NanoSem 230
Ускоряющее напряжение, ток	50/25kV	25/50/100kV	до 50 kV, ток от 0,6 pA до 100 nA
Эмиттер	LaB6	TFE	Полевая эмиссия Шоттки
Максимальные размеры подложки	Пластина 3 дюйма	Пластина 8 дюймов	Пластина 2 дюйма
Минимальный диаметр пучка	8 нм	4 нм	
Минимальная ширина линии	30 нм	8 нм	1,6 нм
Максимальная скорость сканирования	6 МГц	12 МГц	
Точность совмещения линий	40 нм	35 нм	

Контроль структуры поверхности и дефектов в подложках и гетероэпитаксиальных слоях широкозонных материалов

На рис. 1 приведено изображение дефекта на поверхности гетероструктуры GaN/Al₂O₃. На рисунке отчетливо видны гексагональная кристаллографическая структура и тонкая структура плоскостей, ограничивающих дефект. Ядро дефекта состоит из наноразмерных кристаллических образований.

На рис. 2 приведена картина поверхности пластины карбида кремния при разных увеличениях. Отчетливо видны террасы и кристаллографическая структура поверхности.

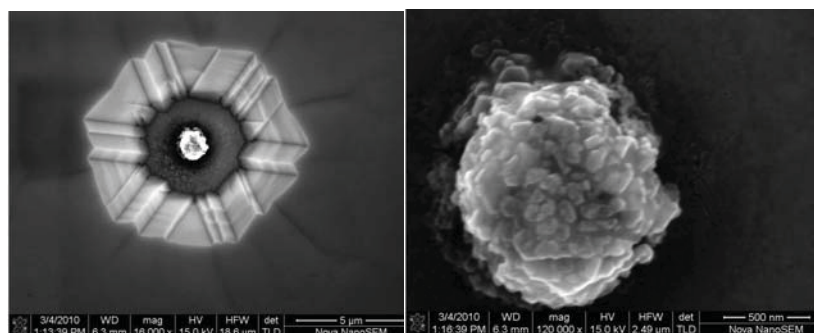


Рис. 1

Дефект гетероструктуры GaN/Al₂O₃.
Справа ядро дефекта при большом увеличении

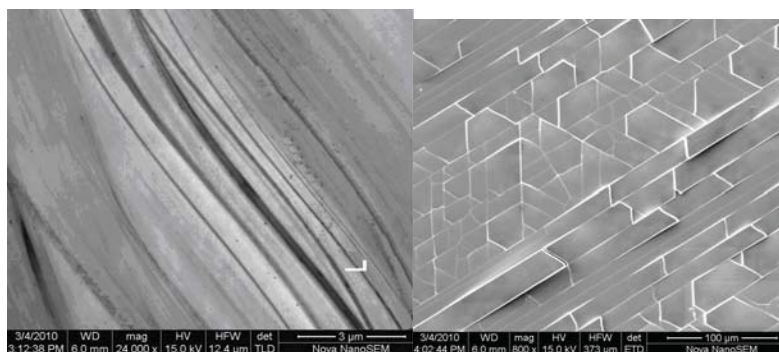


Рис. 2

Структура поверхности пластины карбида кремния: слева - при большом увеличении (24000); справа - при малом увеличении (800)

На рис. 3 приведена картина совершенно правильного круглого отверстия на поверхности той же пластины. Внутри отверстия находятся правильно оgranённые кристаллы размером около 2 мкм.

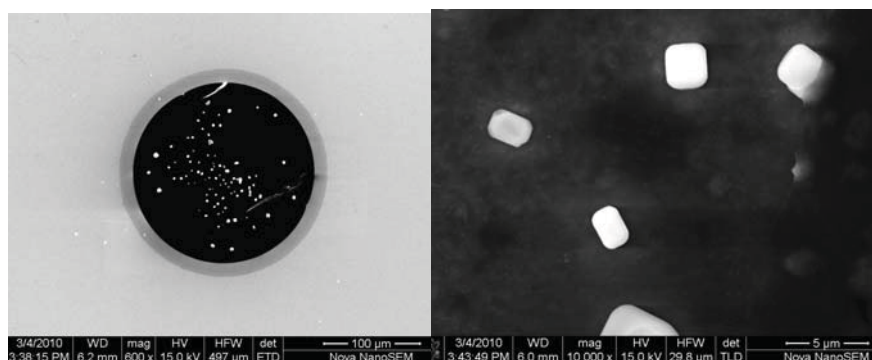


Рис. 3

Круглое отверстие в пластине, снятое при увеличении 600, и кристаллы в отверстии, снятые при увеличении 10000

На рис. 4 приведён фрагмент участка поверхности той же пластины, снятый при увеличении 24000. Видно изображение круглого участка, внутри которого и вне которого находится большое число преципитатов нанометровых размеров, причём в «круглой зоне» эти преципитаты крупнее, чем вне «круглой зоны». В правой части рис. 4 показан участок поверхности пластины с дефектом правильной гексагональной ориентации.

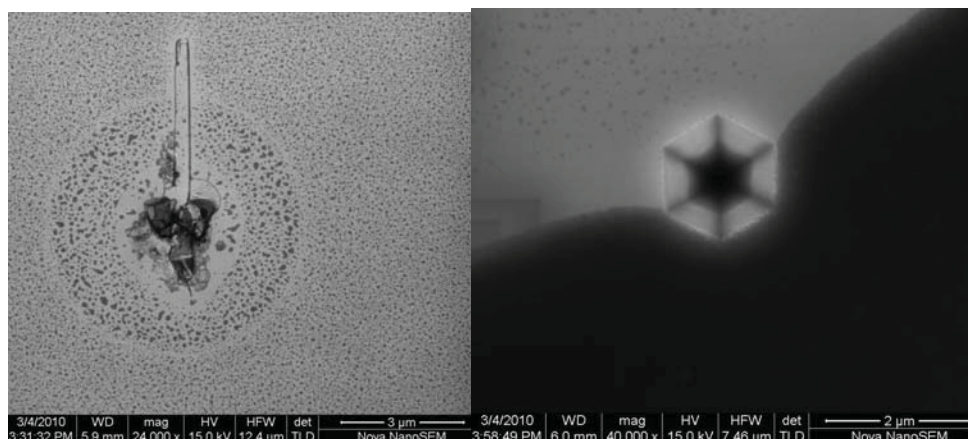


Рис. 4

Фрагменты участков поверхности пластины SiC

Использование рентгеноспектрального микроанализа (РСМА)

Рентгеноспектральный анализ позволяет проводить [6-8]:

- качественный анализ;
- полуколичественный анализ;
- количественное определение элементного состава в данном образце.

Кроме того, можно получать распределение элементов по линии и по площади.

Проводя качественный анализ, узнают, какие элементы присутствуют в исследуемом образце. После полуколичественного анализа получают приблизительное соотношение элементов.

В настоящей работе проводилось исследование металлизации двух образцов сплава

Au/Ge = 83%/17%, применяющегося для изготовления омических контактов полевых транзисторов. Измерения проведены на микроскопе FEI Nova SEM 230.

Количественный анализ дал следующие результаты: в образце №1 в плёнке металлизации весовое содержание золота 71,59%, весовое содержание магния 3,42%. В образце №2 весовое содержание золота 75,83%, весовое содержание германия 1,43%.

Никакого магния, конечно, в образце №1 нет, просто линия $K\alpha$ магния практически совпадает с линией L-спектра германия. Золото идентифицируется по рентгеновскому спектру M-серии.

В дальнейшем измерения на образце №1 были проведены в 13-ти точках и было обнаружено, что состав металлизации в этих точках различается. Это и неудивительно, так как первичный электронный луч может попадать как на зерно, так и на границу между зёрнами, где содержание золота может быть различным.

Выводы

Показано, что метод растровой электронной микроскопии позволяет эффективно контролировать различные дефекты в гетероструктурах широкозонных материалов. В дальнейшем предполагается провести классификацию дефектов и аттестацию пластин и структур по содержанию дефектов различного вида.

Литература

1. Батавин В. В., Концевой Ю. А., Федорович Ю. В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. - М.: Радио и связь, 1985, 264 с., ил.
2. Енишерлова К. Л. Методы контроля дефектов в полупроводниковых материалах и структурах на их основе. / Обзоры по электронной технике. Серия 1. СВЧ Техника, вып. 3, 2003. - М.: ГУП НПП «Пульсар», 177 с., ил.
3. Dieter K. Schroder. Semiconductor material and device characterization. Second edition, NY.: Chichester/Weinheim/Brisbane/Singapore/Toronto, 1998, 760 p.
4. Вылегжанин В. И., Докучаев Ю. П., Концевой Ю. А., Попов В. Г. Применение растрового электронного микроскопа для наблюдения дефектов в полупроводниках. - Электронная промышленность, 1971, № 2.
5. Физические величины. Справочник./ Под. ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. - М.: Энергоатомиздат, 1991, 1232 с.
6. Практическая растровая электронная микроскопия./ Ред. Дж. Гоулдстейн, Х. Яковиц. - М.: Мир, 1978, 518 с.
7. Микроанализ и растровая электронная микроскопия./ Ред. Ф. Морис, Л. Мени, Р. Тиксье. - М.: Металлургия, 1985, 408 с.
8. Гимельфарб Ф. А. Рентгеноспектральный микроанализ слоистых материалов. - М.: Металлургия, 1986, 152 с.