

К. т. н. Л. Д. БУЙКО, к. ф.-м. н. В. Н. ПОНОМАРЬ,
А. А. СОЛОНИНКО

Беларусь, г. Минск, НПО "Интеграл"
E-mail: belms@ belms.belpak.minsk.by

Дата поступления в редакцию
11.07 2001 г.

Оппонент д. т. н. В. А. ПИЛИПЕНКО
(*Белмикросистемы*, г. Минск)

ДИАГНОСТИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР ПРИ РАЗРАБОТКЕ И ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Показана возможность эффективного использования сложного аналитического оборудования при разработке и производстве изделий микроэлектроники.

Разработка современных высококачественных изделий и организация их производства с высокими технико-экономическими показателями невозможны без проведения комплекса аналитических исследований и измерений свойств используемых в составе изделий материалов и комплектующих, в т. ч. и анализа изменений (деградации) их свойств в экстремальных условиях эксплуатации.

Изделия микроэлектроники, в частности, полупроводниковые приборы (ППП) и интегральные микросхемы (ИМС), также требуют детального изучения состава, структурных свойств пленок, в т. ч. и межфазных границ. Такие исследования (измерения) можно проводить только с использованием сложного аналитического оборудования, обладающего высокой локальностью (<1,0 мкм) и точностью измерений, а также высокой степенью автоматизации. Этим требованиям удовлетворяют аналитические средства, основанные на использовании острорасфокусированных электронных, ионных и фотонных пучков, при взаимодействии которых с анализируемым объектом вторичные электроны, ионы, фотоны, рентгеновское излучение и др. несут информацию о микрорельефе, атомарном составе и др. свойствах исследуемых образцов.

В Минском научно-производственном объединении "Интеграл", являющемся одним из ведущих в Европе предприятий по разработке и производству изделий микроэлектроники (ИМС, ППП и др.), функционирует Государственный центр "Белмикросистемы", аттестованный в Национальной системе аккредитации Республики Беларусь. Специалисты Центра знают тонкости современной технологии микросхем и владеют методами исследований и контроля параметров материалов и изделий микроэлектроники, что позволяет на современном уровне анализировать количественный и качественный элементный состав, структурно-морфологические и электрофизические свойства материалов.

Проводимые в ГЦ "Белмикросистемы" исследования обеспечивают выполнение НИОКР по разработке и совершенствованию конструкций, технологических

процессов производства изделий микроэлектроники, поисковые работы по материаловедению для предприятий электронной промышленности, вузов и академических институтов Беларуси. При этом используется уникальное аналитическое оборудование известных зарубежных фирм, которое не только представлено единичными экземплярами в Республике Беларусь, но и является редкостью для стран СНГ, в частности:

Растровый электронный микроскоп высокого разрешения S-806 (Hitachi, Япония):

- съемка микрорельефа поверхности и сколов образцов с увеличением до $\times 100000$ и разрешением до 4 нм;
- измерение линейных размеров микрообъектов более 0,1 мкм, погрешность $\pm 0,02$ мкм.

Растровый электронный микроскоп Stereoscan-360 (Cambridge Instruments, Англия) с энергетическим спектрометром AN-10000 (Link, Англия):

- качественный и количественный локальный рентгеноспектральный анализ элементного состава (элементы от В до U);
- разрешение по объему 1 мкм³, чувствительность 0,1 атом. %.

Сканирующий электронный Оже-микроскоп PHI-660 (Perkin Elmer, США):

- качественный и количественный анализ элементного состава поверхности и по глубине;
- локальность 0,1 мкм, чувствительность 0,1 атом. %.

Ионный микроскоп IMS-4F (Cameca, Франция):

- анализ элементного состава поверхности и по глубине;
- количественный анализ примесей В, Р, As, Sb, О, С в кремнии, примесей Cr, Si в арсениде галлия;
- разрешение по глубине 20 нм, чувствительность до 10^{-6} атом. %.

Просвечивающий электронный микроскоп H-800 (Hitachi, Япония):

- анализ микрорельефа поверхности (реплики);
- изучение микроструктуры на просвет;
- электронно-графический анализ;
- изучение структуры сколов на просвет;
- разрешение до 0,5 нм;
- увеличение до $\times 1000000$.

Измеритель параметров полупроводниковых структур HP-4061A (Hewlett-Packard, США):

- анализ электрофизических параметров диэлектрических, полупроводниковых слоев и границ раздела меж-

ду ними на основе измерений токов ($>0,01$ пА, $\pm 0,2\%$), емкостей (>10 фФ, $\pm 0,2\%$), индуктивностей (>1 пГн, $\pm 0,2\%$).

Прецизионный анализатор параметров полупроводников HP4156B (Hewlett-Packard, США):

- аналитические исследования ВАХ элементной базы ИМС;
- экстракция SPICE-параметров базовых элементов на основе DC—CV измерений;
- диапазоны измерений: напряжение — 2 мкВ...100 В, ток — 10 фА...100 мА.

Система цифровой микрофотосъемки на базе микроскопа Leica INM 100 (Германия) и цифровой камеры Polaroid DMC 1e (США):

- контроль внешнего вида образцов на отражение при увеличении от $\times 16$ до $\times 1600$ в режимах светлого и темного полей;
- цифровая микрофотосъемка наблюдаемого образца с разрешением 400×300 , 800×600 , 1600×1200 точек на кадр и глубиной по каждому основному цвету 8 или 12 бит;
- автоматическая покадровая съемка слоя ИМС при помощи прецизионного сканирующего столика (погрешность сканирования не более 0,1 мкм) с последующей сшивкой кадров в единое масштабированное изображение.

Тепловизионная система Thermovision-880 (Agema, Швеция):

- контроль распределения температуры по поверхности микро- и макрообъектов в реальном масштабе времени в диапазоне температур $-20...+1600^\circ\text{C}$ с разрешением $0,1^\circ\text{C}$ и по площади $\geq (20 \times 20)$ мкм².

Спектрофотометры — MPV-SP (Leica, Германия), Specord-M40, Specord-M80 (Carl Zeiss, Германия):

- анализ оптических характеристик прозрачных материалов в диапазоне длин волн $0,2...50$ мкм, в т. ч. в локальных областях $\geq (5 \times 5)$ мкм².

Наличие в Центре широкого спектра аналитических средств позволяет осуществлять комплексную оценку параметров и свойств материалов и изделий микроэлектроники:

— арбитражную техническую экспертизу ИМС, дискретных ППП и радиокомпонентов для установления физических механизмов и причин отказов;

— экспертную оценку качества тонкопленочных и других твердотельных материалов по анализу их количественного и качественного элементного состава, в т. ч. микродефектов, инородных частиц в заданной точке и распределение элементов по поверхности и объему образца;

— анализ структурно-морфологических свойств твердотельных материалов, различных тонкопленочных композиций, полупроводниковых структур, в т. ч. и их вертикальных сечений, с субмикронным разрешением;

— измерение электрофизических и оптических параметров твердотельных образцов, в т. ч. R, C, L-метрии, определение вольтамперных (ВАХ) и вольт-фарадных (ВФХ) характеристик отдельных элементов интегральных микросхем с локальностью "микронного" контактирования порядка 1×5 мкм, распределения температуры по поверхности микро-

макрообъектов, спектрофотометрические измерения состава оптически прозрачных материалов;

— расчет SPICE-параметров элементной базы ИМС и ПП для диапазона температур $-60...+150^\circ\text{C}$ с использованием программного обеспечения ICSSAR.

ГЦ "Белмикроанализ" выполняет на договорной основе широкий спектр работ в пределах своей области аккредитации не только для НПО "Интеграл", но и для многих предприятий и научных учреждений Беларуси и стран СНГ. При этом номенклатура работ выходит за рамки изделий электронной техники (например, использование тепловидения для диагностики агрегатов Минских ТЭЦ-3, -4, исследование состава археологических объектов из бронзы и чугуна, исследование состава поверхности металлокордовой проволоки и многие другие, не свойственные микроэлектронике, работы).

Однако основным назначением аналитических средств ГЦ "Белмикроанализ" является метрология наукоемкого производства, каким является разработка и серийное изготовление ППП и ИМС в НПО "Интеграл". Это обусловлено высокой стоимостью и сложностью технологического процесса производства данных изделий (несколько сотен прецизионных физико-химических технологических операций), а также необходимостью поставок по кооперации, в т. ч. и внутрифирменной, большого количества материалов, комплектующих и др. для производства изделий микроэлектроники. В этих условиях метрологическое единство измерений параметров материалов, полупроводниковых структур, в т. ч. и на отдельных технологических операциях, обуславливает надежность и качество изготавливаемых изделий и, в конечном итоге, высокие технико-экономические показатели производства для обеспечения их конкурентоспособности как на внутреннем, так и на внешнем рынках сбыта [1].

Среди большого количества измеряемых электрофизических параметров при входном контроле материалов и межоперационном контроле полупроводниковых структур важное значение имеют количественный состав примесей ($>10^{13}$ ат/см³) и геометрические размеры, в частности, толщины тонких (>1 нм) диэлектрических и полупроводниковых пленок [2].

Известно, что примеси щелочных металлов (Na, K, Li) обладают малым ионным радиусом и, соответственно, высокой подвижностью. Их внедрение в полупроводниковые структуры через используемые в процессе производства ППП, ИМС реактивы, газобразные среды, оснастку и др. существенно влияет на надежность ППП, ИМС, вызывая зарядовую нестабильность изделий микроэлектроники и, соответственно, их отказы как при квалификационных испытаниях, так и у потребителя изделий. В связи с этим контроль методом вторично-ионной масс-спектропии (ВИМС) содержания щелочных металлов в полупроводниковых структурах является комплексной оценкой качества технологического процесса (чистоты используемых кислот, растворителей, газовых сред и др.) производства изделий микроэлектроники. Наличие в ГЦ "Белмикроанализ" стандартных образцов фирмы Motorola (США) содержания Na, K,

Li в полупроводниковых структурах позволяет осуществлять достоверный анализ их количественного состава. Нами экспериментально установлено, что предельно допустимое суммарное содержание щелочных металлов для ППП и ИМС с одноуровневой металлизацией не должно превышать 10^{12} ат/см², а для многоуровневой — 10^{13} ат/см².

Большой экономический эффект имеет проводимый в ГЦ "Белмикроанализ" количественный контроль содержания примесей в особо чистом полупроводниковом кремнии. Этот основной в производстве ИМС дорогостоящий материал поставляется по кооперации из России и Украины и требует постоянного входного контроля. Так, наши исследования показали, что при содержании неосновной примеси В в Si на уровне более 10^{14} ат/см³ практически невозможно получить заданные параметры изготавливаемых изделий для телевизионной и силовой электроники и др. При этом используется комплект Государственных стандартных образцов (ГСО) и стандартных образцов (СО) производства Российской Федерации по количественному содержанию основных примесей в кремнии и арсениде галлия, в частности:

— стандартный образец состава поверхностных слоев монокристаллического кремния ионнолегированного бором (ГСО 4982—89);

— стандартный образец состава поверхностных слоев монокристаллического кремния ионнолегированного фосфором (ГСО 4983—89);

— стандартный образец состава поверхностных слоев монокристаллического арсенида галлия ионнолегированного кремнием (ГСО 5441—90);

— стандартный образец состава поверхностных слоев монокристаллического арсенида галлия ионнолегированного хромом (ГСО 5442—90);

— стандартный образец состава поверхностных слоев монокристаллического кремния ионнолегированного сурьмой (Si:Sb) (СО 22-223—99);

— стандартный образец состава поверхностных слоев монокристаллического кремния ионнолегированного мышьяком (Si:As) (СО 21-223—99);

— стандартный образец состава поверхностных слоев монокристаллического кремния ионнолегированного кислородом (Si:O) (СО 23-223—99);

— стандартный образец состава поверхностных слоев монокристаллического кремния ионнолегированного углеродом (Si:C) (СО 24-223—99).

Известно, что основным процессом изготовления ИМС является планарно-эпитаксиальная технология, основанная на принципе группового изготовления кристаллов ИМС путем

— эпитаксиального наращивания полупроводниковых слоев на поверхности полупроводниковых и диэлектрических подложек;

— наращивания одно- и многослойных диэлектрических покрытий на пластины;

— проведения фотолитографических процессов и локального травления диэлектриков для последующего создания активных и пассивных элементов методами термической диффузии или ионно-плазменного легирования и травления;

— нанесения тонких металлических слоев и создания методами фотолитографии металлизированных разводок.

В связи с этим толщина слоя становится важным параметром конструкции ИМС, и особое значение приобретает единство измерений при контроле толщин тонких пленок.

В ГЦ "Белмикроанализ" разработана конструкция и методика аттестации стандартных образцов предприятия (СОП) для контроля толщины тонких диэлектрических слоев на кремнии. Метрологическая аттестация СОП осуществляется на аттестованном метрологической службой НПО "Интеграл" эллисометре ЛЭФ 3М-1 производства России. СОП толщины диэлектрических пленок поставляются в цеха серийного производства изделий (ППП, ИМС и др.) и надежно обеспечивают контроль работы различных измерительных систем (толщиномеров, эллисометров, профилометров и др.).

Таким образом, эффективное использование аналитического оборудования при проведении комплекса исследований и измерений свойств используемых в составе изделий материалов и комплекующих позволяет организовать входной контроль количественного состава примесей на уровне $>10^{12}$ ат/см² в полупроводниковых монокристаллическом кремнии, в полупроводниковых структурах, контроль геометрических размеров элементов изделий, толщин тонких ($>1,0$ нм) пленок диэлектриков, металлов и полупроводников, что, в свою очередь, обеспечивает высокие технико-экономические показатели разработки и производства изделий микроэлектроники.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Контроль в технологии микроэлектроники / Колешко В. М., Гойденко П. П., Буйко Л. Д. — Минск: Наука и техника, 1978.

2. Белоус А. И., Буйко Л. Д., Пономарь В. Н. Экспедиция внутрь кристалла // Техника. Экономика. Организация.— 1998.— № 2.— С. 34—35.