ИОННО-ЛУЧЕВОЙ ТРИММИНГ В ПРОИЗВОДСТВЕ УСТРОЙСТВ НА АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

ION BEAM TRIMMING IN MANUFACTURING OF ACOUSTIC WAVE DEVICES

Д-р М.Зейнер*, К.Гюндель*, Т.Дунгер*, М.Деммлер*, М.Нестлер*
Dr. M.Zeuner*, K.Gündel*, T.Dunger*, M.Demmler*, M.Nestler*

В производстве электронных компонентов для мобильных систем связи требуется обеспечение исключительно высокой точности геометрических размеров. В частности, качество фильтров на поверхностных акустических волнах (ПАВ) и объемных акустических волнах (ОАВ) зависит от геометрии слоев из разных материалов, причем погрешности должны лежать в субнанометровом диапазоне. Процессы осаждения тонкопленочных покрытий, используемые в массовом производстве полупроводниковых приборов, не могут обеспечить требуемой точности, следовательно, необходимо решение для корректировки размеров покрытий уже после их нанесения на подложку [1, 2]. В статье описывается технология, отвечающая указанным требованиям. Для корректировки размеров слоев используется фокусированный ионный луч и система перемещения обрабатываемой пластины. Количество удаляемого ионным лучом материала регулируется путем управления временем воздействия в каждой точке сканирования, что позволяет получать требуемую толщину покрытия.

The manufacturing of devices for mobile communication technology demands an extremely high precision regarding geometrical dimensions. In case of acoustic wave filters, surface acoustic wave (SAW) and bulk acoustic wave (BAW) resonators, the quality depends a lot on the dimensions of several layers consisting of different material, hence an adjustment regarding homogeneity in sub-nm range has to be guaranteed. Thin film deposition processes, used commonly in the industrial mass production in semiconductor industry, are not able to reach these demanding requirements in order to achieve the necessary device quality. On account of this a space-resolved correction of layer dimensions as a subsequent manufacturing step is mandatory [1, 2]. Within the article a technology of space-resolved correction of device wafer is described. The correction takes place due to a focused broad ion beam and a movement of wafer in front of it. Hence the ion beam etches the surface of the wafer and the modulated dwell time of the beam on a certain position of the wafer defines the amount of ablated material in order to achieve the target geometry or thickness all over the wafer.

В последние годы ионно-лучевые технологии все более широко применяются для обработки материалов в производстве и исследованиях оптических и полупроводниковых устройств. Благодаря высокому качеству, стабильности и некоторым специфическим особенностям ионно-лучевых технологий обеспечивается точный контроль рабочих параметров процессов при пространственном разрешении, достаточном для уменьшения отклонений геометрии до требуемых величин [3]. Поэтому коррекции кривизны поверхности или толщины могут выполняться с точностью, недостижимой при применении других технологий.

При обработке пластин с фильтрами на поверхностных или объемных акустических волнах

резонансная частота каждого устройства должна находиться в пределах определенного диапазона. В последние годы данное требование становится все более трудно выполнимым, так как увеличение скорости передачи данных обуславливает сужение полосы частот. Это означает, что отклонения толщины пьезоэлектрического резонансного слоя и электродного материала всех устройств, размещенных на пластине, не должны превышать субнанометровых величин. Помимо допусков, связанных с производственными процессами, следует учитывать возможность отклонения частоты резонатора вследствие температурного дрейфа. Таким образом, чем уже допустимая полоса частот, тем большее число фильтров требуют коррекции с применением

* scia Systems GmbH

ионно-лучевой технологии, а также специальной температурной компенсации.

В общем случае, коррекция толщины слоя может быть реализована путем регулирования энергии ионов и ионного тока или управления временем воздействия при модуляции скорости.

ПРИНЦИПЫ КОРРЕКЦИИ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНОК

Предварительное измерение целевой характеристики, например резонансной частоты фильтра на акустических волнах, позволяет создать карту распределения значений, которая служит исходной информацией для коррекции. Учитывая размер пятна ионного луча, методом итеративной обратной свертки рассчитывается время воздействия. Размер пятна ионного луча калибруется для каждого материала. Высокоточная и высокоскоростная система позиционирования обеспечивает сканирование в соответствии с рассчитанным маршрутом движения ионного луча относительно пластины. Данная технология получила название "ионно-лучевого тримминга" (рис.1).

В технологической установке для ионно-лучевого тримминга scia Trim 200 используется управление временем воздействия при постоянном размере пятна ионного луча.

Рис.1. Принципиальная схема ионно-лучевого тримминга

Fig.1. Principle of ion beam trimming

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНОК

Система scia Trim 200 предназначена для работы с пластинами диаметром до 200 мм. Для подачи пластины из кассеты используется робот, соединенный с системой предварительного выравнивания и устройством идентификации. После выравнивания и идентификации пластина подается в рабочую камеру, где расположены ионный источник и система позиционирования (рис.2).

Для хорошей производительности важно высокое быстродействие механизма позиционирования

Within the last years ion beam technologies got a strong increase of importance for material processing in optics and semiconductor industry and research.

Due to the high quality, stability and certain specific process features of the ion beam technology an exact controlling of the working parameter during processes enables a space-resolved etching of an error function down to the required geometrical dimension [3].

Hence surfaces curvatures or thickness corrections can be realized with precision, which cannot be achieved by other process technologies.

In case of SAW and BAW device wafers the center frequency of each device/resonator has to be within a specified range. During that last years, those specifications become tighter due the need to increase the data transmission rate which results more and narrower frequency bands.

This means that also the thickness of the piezoelectric resonance layer and of the electrode material of all devices, distributed over the wafer, has to meet the specification within a deviation in sub-nm range. Additionally to the variation of device properties due to the production process, resonator frequencies could be out of spec due to temperature drifts. Hence as narrower the specifications for the frequency bands are, as more filters need to manufactures using ion trimming technologies and special temperature compensation.

In general, the film thickness trimming could be realized by varying ion energy and ion current or by dwell time respectively velocity modulation.

PRINCIPLE OF CORRECTION TECHNOLOGY

Due to a pre-measurement of the target specification parameter, for

example resonance frequency of the acoustic wave filters, a distribution mapping is generated as starting point. Together with the knowledge of the ion beam footprint the dwell time profile is calculated via iterative deconvolution. The ion beam footprint has to be calibrated on each material. A high precision and high performance axis system implements the scanning with the calculated movement profile of the ion beam in respect to the device wafer stage. The technology is referred to as ion beam trimming. (fig.1) The scia Trim 200 used a constant beam profile during the complete process. The trimming is realized by dwell time modulation.

EQUIPMENT FOR FILM THICKNESS CORRECTION

The scia Trim 200 system is designed for thickness correction of wafers with a diameter up to 200 mm.

Рис.2. Схема установки scia Trim 200 с левым расположением рабочей камеры и правым расположением системы загрузки пластин

Fig.2: Layout of scia Trim 200 with left side process chamber and right side handling unit

по оси X. По оси Y выполняется "кадровая развертка", а регулирование наклона служит для юстировки угла падения ионного луча на поверхность пластины. В целом, система обеспечивает высокую степень свободы установки пластины.

Пластина фиксируется в держателе механическим зажимным кольцом, на держателе установлен электрод системы выравнивания, служащий для профилирования ионного луча. В процессе обработки пластина охлаждается с обратной стороны гелием. Эффективное охлаждение необходимо

для предотвращения деградации фоторезиста и повреждения чувствительных материалов, например кварца и ниобата лития, применяемых в фильтрах на ПАВ.

Ионный источник, снабженный нейтрализатором для предотвращения зарядки поверхности пластины, установлен в куполообразной части рабочей камеры, и подвижен по оси Z для регулировки фокуса. Технологическим газом, как правило служит аргон, но также могут использоваться криптон, кислород и другие газы. Фокусировка ионного луча, который имеет гауссово распределение энергии, в пятно диаметром от 3 до 6 мм выполняется системой из трех графитовых или молибденовых кольцевых элементов.

Встроенное программное обеспечение рассчитывает матрицу времен воздействия ионного луча и контролирует все параметры процесса, обеспечивая обработку пластин в автоматическом режиме. Расчет времен воздействия ионного луча выполняется непосредственно перед началом обработки пластины. Расширенные функции протоколирования и такие интерфейсы, как SECS/GEM, позволяют использовать оборудование в крупносерийном и массовом производстве.

КОРРЕКЦИЯ ЧАСТОТ ФИЛЬТРОВ НА ПАВ

Фильтры на ПАВ состоят из подложки – прецизионно ориентированного пьезоэлектрического кристалла из кварца, танталата лития LiTaO_3 или ниобата лития LiNbO_3 – и двух расположенных

The wafer transfer is done by a 4 port handling robot connected to wafer cassette load-lock and a pre-aligning system with an ID reader. After alignment and determination of the wafer number, the wafer is handled into the process chamber with the ion beam source and axis system (fig.2). For the trimming process an X-axis with high performance is essential, because this axis controls the velocity profile of the ion beam. Together with the Y-axis for the line feed and tilt axis for wafer transfer and ion incident angle adjustment, the axis system enables a high degrees of freedom for the wafer stage movement. The wafer stage consist

of the wafer chuck for accommodation of wafer via mechanical clamping ring and an alignment electrode for ion beam profile measurement. A Helium backside thermal contact realizes cooling of the wafer during process. A good cooling during process is essential to avoid any photo resist degradation or wafer breakage of sensitive materials used for SAW devices like Quartz or Lithium Niobate.

The ion beam source with the neutralizer for avoidance of wafer surface charging are mounted in the dome-shaped part of the process chamber on a Z-axis for focus adjustment. The common process gas is argon, but

also other gases for example krypton and oxygen can be used. The focusing of the Gaussian-like ion beam to a diameter 3-6 mm (standard deviation) is realized by a curved 3-gird system, which consists of graphite or molybdenum.

The internal system software calculates the dwell time mapping, controls all process parameters and hence realizes the correction process completely automatically. The dwell time calculation is performed directly before processing of each wafer. Advanced logging features and interfaces like SECS/GEM make the tool highly suitable for high volume production.

сверху встречно-штыревых преобразователей (ВШП). ВШП преобразует электрические сигналы в механические волны благодаря двум соединенным друг с другом гребенчатым электродам (рис.3). Напряжение между электродами приводит к деформации пьезоэлектрического материала, который генерирует акустические волны, распространяющиеся на его поверхности. При резонансе второй ВШП преобразует ПАВ обратно в электрический сигнал. Резонансная частота и ширина полосы зависят от длины, ширины, положения и массы ВШП.

В некоторых фильтрах на ПАВ предусмотрен специальный слой для температурной компенсации с целью предотвращения сдвига частоты при изменении температуры. Обычно применяется диоксид кремния, так как для него зависимость модуля Юнга от температуры обратна таковой для пьезоэлектрической подложки. Установка scia Trim 200 позволяет точно отрегулировать частоту резонанса для каждого расположенного на пластине устройства. Пространственное разрешение ионного луча дает возможность очень точно корректировать толщину слоя SiO_2 , регулируя таким образом массу резонатора и получая требуемое значение частоты.

Пример коррекции фильтров на ПАВ на пластине диаметром 100 мм представлен на рис.4. В качестве исходных данных использовались значения резонансной частоты для каждого фильтра. После коррекции слоя SiO_2 стандартное отклонение уменьшилось с 15,3 до 0,5 МГц, то есть более чем в 30 раз.

Рис.3. Принципиальная схема фильтра на ПАВ

Fig.3. Principle of a SAW device

КОРРЕКЦИЯ ЧАСТОТ ФИЛЬТРОВ НА ОАВ

При создании высокочастотных фильтров для систем мобильной связи фильтры на ОАВ все чаще заменяют аналоги на ПАВ. Использование ОАВ обеспечивает преимущества при частотах выше 2,4 ГГц. Фильтры на ОАВ характеризуются компактностью и производительностью, кроме того, в последние годы удалось добиться снижения их себестоимости.

В фильтре на ОАВ используется пьезоэлектрическая пленка, как правило изготовленная из нитрида алюминия, которая соединена с двумя электродами (рис.5). Для получения акустического резонатора толщина пьезоэлектрической пленки должна равняться половине длины продольной акустической волны. Таким образом, ее толщина определяется скоростью звука в пьезоэлектрике и необходимой резонансной частотой.

FREQUENCY CORRECTION OF SURFACE ACOUSTIC WAVE DEVICES

SAW filters consist of one precisely oriented piezoelectric crystal as substrate like Quartz, Lithium Tantalate (LiTaO_3) and Lithium Niobate (LiNbO_3) and two interdigital transducers (IDT) on top. IDTs convert electrical signals to a mechanical wave due to two interlocking comb-shaped electrodes (finger electrode pairs) which are applied to a piezoelectric substrate (fig.3). A voltage between the electrodes result in a deformation of the piezoelectric material that generates acoustic waves propagating on the piezoelectric material surface. After resonating the other IDT transform

the SAW back to an electrical signal. The resonant frequency and bandwidth can be adjusted by length, width, position and mass of the IDT.

A lot of SAW devices are using a special temperature compensation layer to avoid any frequency shift due to temperature change. Commonly silicon dioxide is used because the change of the young's module with temperature is inverse to the substrate. With the scia Trim 200 the resonance frequency of each device can be adjusted. Due to the space-resolved ion beam etching of the SiO_2 layer the right mass of the resonator structure and hence the target frequency can be reached.

As example for SAW device quality enhancement fig.4 shows pre and post frequency results of a SiO_2 temperature compensation film of a 100 mm wafer. The measurement of the center frequency of each device has been used as input data. The standard deviation is reduced from 15,3 MHz to 0,5 MHz, which results in an improvement factor of over 30.

FREQUENCY CORRECTION OF BULK ACOUSTIC WAVE DEVICES

High frequency filters in mobile communication increasingly apply the BAW principle rather than the SAW principle. BAW becomes advantageous against SAW for frequencies

Рис.4. Коррекция фильтров на ПАВ на пластине диаметром 100 мм с помощью установки scia Trim 200 обеспечила уменьшение стандартного отклонения с 15,3 до 0,5 МГц

Fig.4. Pre and post frequency trimming results of a SiO₂ temperature compensation film of a 100 mm wafer by scia Trim 200. Pre standard deviation – 15.3 MHz, post standard deviation – 0.5 MHz

Для акустической изоляции резонатора от подложки применяются два вида решений. В резонаторе FBAR-типа между подложкой и резонатором предусмотрена полость, а в SMR-типе (рис.5) используется акустическое зеркало, состоящее из чередующихся пленок с высоким и низким акустическим сопротивлением. Такие материалы, как диоксид кремния и вольфрам, позволяют добиться хорошей изоляции при небольшом числе слоев. Частота фильтра на ОАВ регулируется дополнительной массой на верхнем электроде, например, из нитрида кремния.

К точности параметров каждого слоя, особенно пьезоэлектрической пленки из нитрида алюминия, предъявляются очень высокие требования. Отклонение от требуемой величины всего на 0,5% приводит к уменьшению выхода годных устройств на несколько десятков процентов. Использование ионно-лучевой коррекции позволяет улучшить повторяемость характеристик в 10–40 раз (рис.6). Благодаря этому выход годных устройств может превысить 90%.

Выравнивание толщины пленки из нитрида алюминия – наиболее эффективный способ

Рис.5. Принципиальная схема фильтра на ОАВ SMR-типа
Fig.5. Principle of a BAW (SMR) device

above 2,4 GHz. The devices are very small and have a very good performance at the same time. Also the productions costs have been reduced over the last years.

A BAW filter uses a piezoelectric film commonly made of aluminum nitride, which is contacted by two electrodes (fig.5). To generate an acoustic resonator, the thickness of the piezoelectric film has to match to $\lambda/2$ of the wavelength of the longitudinal acoustic wave. Means the thickness is defined by the acoustic velocity of the piezo material and the target resonance frequency.

Additionally the resonator needs to be acoustically isolated from

Рис.6. Коррекция толщины пленки из нитрида алюминия на пластине диаметром 150 мм с помощью установки scia Trim 200 позволила уменьшить стандартное отклонение с 13,3 до 0,3 нм.

Fig. 6. Pre and post thickness trimming results of a AlN film on a 150 mm wafer by scia Trim 200, pre standard deviation: 13.3 nm, post standard deviation: 0.3 nm

коррекции, так как эта характеристика определяет частоту резонанса. Дополнительная регулировка возможна путем изменения массы генератора. Коррекция акустического зеркала также позволяет оптимизировать характеристики фильтров.

ВЫВОДЫ

Технология scia Trim обеспечивает корректировку резонансной частоты фильтров на ПАВ и ОАВ, позволяя увеличить выход годных устройств с нескольких десятков процентов до более чем

90% в условиях промышленного массового производства. Без использования ионно-лучевого тримминга эффективный выпуск промышленных объемов частотных фильтров для мобильных систем связи невозможен.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lakin K.M., Kline G.R., McCarron K.T., High-Q. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 12, 1993. S. 41.
2. Aigner R. 2nd Int. Symp. Acoustic Wave Dev. Fut. Mob. Comm. Syst., Chiba (Japan) 2004.
3. Wolf B. Ion sources, CRC Press, Boca Raton, 1995.

the substrate. There are two different types. Free Bulk Acoustic Resonator (FBAR) devices use a cavity between substrate and resonator. The Solidly Mounted Resonators (SMR), which are shown in fig.5, use an acoustic mirror to achieve an isolation from the substrate. The acoustic mirror is made of alternating $\lambda/4$ films with high and low acoustic impedance. With typical materials like silicon dioxide and tungsten, a few layers only are needed to achieve a very good isolation.

The final frequency of each device is adjusted by an additional mass load on top, which is deposit

on the top electrode, e.g. silicon nitride.

The requirements for the layer uniformity of each material, especially the AlN piezo layer, are very high. Realistic deposition homogeneity deviations of 0,5% lead to the final device yield of few ten percent only. By using additional tuning steps, the ion beam trimming, the layer homogeneities can typically be improved by factor of 10 to 40 (fig.6). Thus, final device yields of more than 90 % can be achieved.

Thickness adjustments of the AlN piezo layer are most important, because its thickness directly defines the resonance frequency.

The frequency is additionally influenced by the mass load of the oscillator. Thus, mass load trimming helps to further improve yield. By trimming the acoustic mirror layers, additional quality factors of the RF device can be optimized.

SUMMARY

The scia Trim technology enables a frequency adaptation of SAW and BAW devices on a wafer in order to increase the device yield from several 10% to over 90% in industrial mass production. Without ion beam trimming a cost effective mass production of frequency filter for mobile communication is not possible. ■