ИЗГОТОВЛЕНИЕ НАНОУСТРОЙСТВ НА УСТАНОВКАХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ЛИТОГРАФИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

NANODEVICE FABRICATION TECHNOLOGIES WITH ADVANCED HIGH RESOLUTION ELECTRON BEAM LITHOGRAPHY SYSTEMS

М.Шибата*, Т.Обата*, Х.Ой* / shibata@crestec8.co.jp
M.Shibata*, T.Obata*, H.Ohyi*

Электронно-лучевая литография (ЭЛЛ) широко применяется в производстве наноразмерных устройств. Японская корпорация Crestec разработала модель CABL-UH – систему ЭЛЛ высокого разрешения с ускоряющим напряжением 130 кВ. В статье рассматриваются концепция, характеристики и потенциальные области применения этой системы.

Electron beam lithography (EBL) systems are widely utilized in a nanodevice fabrication. Crestec Corporation developed a high resolution EBL system, CABL-UH with a 130 kilovolts high acceleration voltage. The machine concept, specification and writing performance of the system and potential applications are discussed in this article.

Нанотехнологии – одно из наиболее инновационных направлений техники, которое создает предпосылки для прорывов во многих областях: информационных технологиях, биотехнологиях, энергетике, экологии и т.д. Корпорация Crestec способствует развитию нанотехнологий, создавая системы ЭЛЛ, которые позволяют изготавливать устройства с наноразмерной структурой. В частности, Crestec разработала однолучевые электронные литографы с трехкоординатным (XYZ) столом серии CABL-9000C (ускоряющее напряжение до 50 кВ) и серии CABL-UH (ускоряющее напряжение до 130 кВ), а также двухкоординатным (X-theta) столом серии CEBR-3000. Кроме того, Crestec разрабатывает высокопроизводительные системы многолучевой литографии для масочной и безмасочной технологий.

Рассмотрим концептуальные решения, заложенные в оборудование Crestec, его возможности и потенциальные области применения.

КОНЦЕПЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

Серия CABL-UH разработана для задач, требующих экспонирования с высоким уровнем разрешения, стабильности и надежности. Для обеспечения высокого

разрешения и малого размера пятна луча ускоряющее напряжение до 130 кВ сочетается с применением электронной пушки, которая выполняет одноступенчатый разгон потока электронов с минимальным кулоновским рассеянием [1]. Так как для стабильности и надежности работы электронной пушки основной проблемой являются микроразряды, причем считается, что при одноступенчатом разгоне электронов они происходят чаще, чем в пушках с многоступенчатой системой разгона, специалисты Crestec использовали в конструкции специальные функциональные материалы, что позволило исключить данное явление. Кроме того, влияние на работу рассеивающего магнитного поля, отклонений температуры и вибраций минимизировано без использования специальной защиты рабочего помещения. Благодаря перечисленным особенностям конструкции системы CABL-UH коэффициент готовности может превышать 90%.

ХАРАКТЕРИСТИКИ

Основные характеристики оборудования представлены в таблице. Серия включает три модели: CABL-UH90, CABL-UH110 и CABL-UH130 с максимальным ускоряющим напряжением 90, 110 и 130 кВ

* Crestec Corporation.

Спецификации систем ЭЛЛ серии CABL-UH

The specification of the CABL-UH series

Ускоряющее напряжение, кВ Acceleration voltage, kV	90; 110; 130
Минимальный диаметр луча, нм Minimum beam diameter, nm	1,9; 1,7; 1,6
Минимальная ширина линии, нм Minimum line width, nm	9; 8; 7
Точность совмещения при размере поля 60 мкм, нм Stitching accuracy at 60 μ m field, nm	20
Точность наложения при размере поля 120 мкм, нм Overlay accuracy at 120 μ m field	35
Погрешность тока луча (10 ч), % Beam current stability (10 h), %	$\pm 0,5$
Погрешность позиционирования луча (5 ч), нм Beam position stability (5 h), nm	± 30

соответственно. Ускоряющее напряжение может регулироваться с шагом 5 кВ. Минимальный размер пятна луча составляет 1,6 нм при напряжении 130 кВ (рис.1). При силе тока луча 2 нА размер пятна не превышает 2 нм. При напряжении 130 кВ минимальная ширина линии составляет 7 нм. Погрешность совмещения и наложения элементов изображения: 20 нм для поля 60 мкм и 35 нм для поля 120 мкм. Отклонение значения тока электронного луча (стабильность луча) составляет менее $\pm 0,5\%$ в течение 10 ч работы, причем измерение этого значения на практике показало значительно более высокую точность: $\pm 0,08\%$ за 48 ч

(рис.2). Погрешность позиционирования луча не превышает ± 30 нм в течение пяти часов работы.

СИСТЕМА ЭЛЛ CABL-UH ПРИ РАБОТЕ С НЕГАТИВНЫМИ РЕЗИСТАМИ

Малый размер пятна луча позволяет формировать наноразмерные структуры полевых транзисторов, МОП-систем, фотонных кристаллов, оптических модуляторов, штампов для наноимпринтинга и др. В отличие от систем оптической литографии, CABL-UH позволяет сделать процесс одностадийным, исключая дополнительные операции (травление

Nanotechnology is one of the most active technologies that generates industrial revolutions in many fields such as IT, biotechnology, energy, ecology and so on. Crestec Corporation contributes to the growth of the nanotechnology with development of electron beam lithography (EBL) systems, which play the leading role in nanodevice fabrications because of capability of single-nano-scale pattern formation. Crestec developed dedicated point beam EBL systems, XYZ stage model of CABL-9000C (up to 50 kV), CABL-UH (up to 130 kV) and X-theta stage model of CEBR-3000 series. Crestec is also developing massively parallel EBLs with and

without a mask for high volume manufacturing.

In this article, the machine concept, specifications and writing performances of the CABL-UH series and potential applications are discussed.

MACHINE CONCEPT

CABL-UH series were developed to realize the high resolution writing, high stability and high reliability. To achieve the high resolution fabrication, the high acceleration voltage of up to 130 kV is adopted and a beam spot size is reduced by the single-stage acceleration electron gun which suppresses Coulomb blur [1]. On the other hand, to achieve high stability and reliability, micro-discharge is the main problem for the electron gun. In

principle a micro-discharge happens more often in a single-stage acceleration electron gun than in a multi-stage electron gun, but our electron gun is made with high-work-function materials and is microdischarge-free. In addition, a stray magnetic field, temperature variation and vibration are controlled without a dedicated shielding room because these disturbances sometimes affect writing performance. Owing to above mentioned design, uptime of more than 90% is feasible in CABL-UH.

SPECIFICATIONS

The standard specification of the CABL-UH series is shown in Table. Crestec has three types of CABL-UH90, CABL-UH110 and

Рис.1. Расчетный диаметр луча системы CABL-UH

Fig.1. The beam diameter of the CABL-UH (calculated)

Рис.2. Девияция тока луча в системах CABL-UH

Fig.2. The beam current stability of the CABL-UH

CABL-UH130 and the maximum acceleration voltage is 90, 110 and 130 kV, respectively. The acceleration voltage can be changed by 5 kV step. The minimum beam spot size is 1.6 nm at 130 kV as shown in fig.1. At the beam current of 2 nA, the spot size is still less than 2 nm. The minimum line width is 7 nm at 130 kV. Stitching and overlay accuracy are 20 nm at 60 micrometer field and 35 nm at 120 micrometer field, respectively. Beam current stability is better than plus-minus 0.5% for ten hours, although actual data show plus-minus 0.08% for 48 hours (fig.2). Beam position stability is better than plus-minus 30 nm for five hours.

APPLICATIONS OF CABL-UH ELECTRON BEAM LITHOGRAPHY WITH NEGATIVE-TONE RESISTS

The narrow point beam can resolve the very small and precise structures, which offers the smallest structure for nano-scale devices such as FET devices, MOS devices, photonic crystals, optical modulators and nano-imprint molds, etc. Compared with the optical lithography methods, CABL-UH affords to fabricate the single-nano-scale structures without any additional processes such as a Lithography-Etching method. We can directly draw fine structures of several nanometers. We demonstrate some

и др.). Возможно прямое получение тонких структур нанометровых размеров. Рассмотрим несколько примеров работы с негативным резистом.

Качество воспроизведения изолированных линий и линейчатых структур (чередований линий с пробелами) характеризуют разрешение экспонирования. В экспериментах с использованием в качестве резиста каликсарена толщиной 20 нм минимальная толщина линий составила 7 нм (рис.3а), причем при работе с резистом меньшей толщины это значение может быть снижено.

Также были проведены тесты с применением негативного резиста из водородного силсесквиоксана (HSQ) толщиной 30 нм. Для улучшения разрешения

exposure examples with conventional electron beam resists.

Isolated lines and line-and-space (L/S) patterns specify the exposure resolution. We perform the exposure resolution tests with them. A 20-nanometer thick Calixarene is a good candidate to show the critical line width of the exposure. We have resolved the minimum line width of 7 nm (fig.3a). This critical dimension would be reduced with a thinner resist.

We also examine an HSQ negative-tone resist. Resist thickness is 30 nm. No prebaking is undertaken so as to have a good pattern resolution. The exposure condition

Рис.3. Воспроизведение изолированных линий и линейчатых структур: а – изолированные линии на каликсареновом резисте; б – линейчатая структура при шаге 20 нм; с – линейчатая структура при шаге 16 нм

Fig.3. Lines and line-and-space patterns: a – Isolated lines with a Calixarene negative-tone resist; b – Line-and-space pattern of 20 nm pitch; c – Line-and-space patterns of 16 nm pitch

предварительная термообработка не проводилась. Ускоряющее напряжение при экспонировании составило 110 кВ, ток луча – 60 пА. При экспонировании линейчатой структуры – задаче, которую часто приходится решать при производстве БИС и фотонных устройств – были четко воспроизведены элементы шириной 10 нм (рис.3б). На практике в подобных структурах нередко удается получить и элементы шириной менее 10 нм. На рис.3с видно, что, хотя границы линий начали терять четкость и контраст ухудшился, но качество приемлемо для практики. Для улучшения воспроизведения линейчатых структур в системах CABL-UH реализован эффект коррекции близости – алгоритм PEC (Proximity effect correction).

СИСТЕМА ЭЛЛ CABL-UH ПРИ РАБОТЕ С ПОЗИТИВНЫМИ РЕЗИСТАМИ

Позитивные резисты широко используются в ЭЛЛ. Поскольку электроны рассеиваются в резисте, сложно оценивать размеры элементов, с высокой точностью известна только толщина слоя. В экспериментах использовался позитивный резист достаточно большой толщины. Из-за высокого ускоряющего напряжения электронный луч в CABL-UH относительно слабо рассеивается, поэтому формируемые элементы имеют ровные стенки, что благоприятно для глубокого реактивного ионного травления, а также lift-off процесса.

Позитивный резист ZEP-520A (Nihon ZEON) толщиной 1,4 мкм был нанесен на поверхность

is following. The acceleration voltage and the beam current are 110 kV and 60 pA, respectively. The L/S lithography patterns, which are very useful for producing LSIs and photonic devices, are demonstrated. Ten-nanometer half-pitch patterns are clearly obtained (fig.3b). We often succeed in resolving sub-ten-nanometer half-pitch L/S patterns (fig.3c). It looks that narrow pitch patterns have been affected by a proximity effect, and the contrast looks worse, but it is still good for applications of dry etching. Proximity effect correction (PEC) is available for the CABL-UH.

APPLICATIONS OF CABL-UH ELECTRON BEAM LITHOGRAPHY WITH POSITIVE-TONE RESISTS

The positive-tone resists are commonly used for EBL. Because the electron beam for taking secondary electron beam image would degrade the resist during observation, we cannot judge the real gap width, but the resist thickness is fairly precise. We demonstrate the lithography patterns with relatively thicker positive-tone resists. The electron beam in CABL-UH is less forward-scattering because of the high acceleration voltage, and we can form a very deep but straight structure, which are useful for

deep reactive ion etching (deep RIE) process and conventional lift-off process.

ZEP-520A positive-tone resist (Nihon ZEON) is spin-coat on a silicon wafer surface, followed by pre-baking. The resist thickness is 1.4 micrometers. The larger acceleration voltage of 130 kV is promising for making deep and straight gaps (fig.4a). The current is 200 pA. The beam diameter would be broadened by a Coulomb effect, but still the gap at the bottom is measured as 80 nm. The deep RIE process can form deep micro-fin structures.

The tee-shaped gate (T-gate) pattern is a good application of

Рис.4. Результаты экспонирования позитивного резиста: а – для обеспечения стабильности размеров узкой длинной канавки требуется ускоряющее напряжение 130 кВ; б – трехслойная структура для формирования Т-образного элемента. Ускоряющее напряжение 130 кВ позволило выполнить экспонирование по всей толщине резиста

Fig.4. Exposure results of positive-tone resists: a – Narrow gap with a high aspect ratio. Strong acceleration voltage of 130 kV is needed to keep the gap constant; b – Fabricating a T-gate structure with a tri-layer resist. Electron beam can travel down to the wafer surface because of the high voltage of 130 kV

кремниевой пластины методом центрифугирования с последующей предварительной термообработкой. Максимальное ускоряющее напряжение 130 кВ использовалось для создания глубоких прямых канавок (рис.4а). Ток электронного луча составлял 200 пА. Хотя кулоновское рассеяние вызвало увеличение диаметра луча, ширина в нижней части

экспонировавшегося элемента составила 80 нм. При таких параметрах применение глубокого реактивного ионного травления позволяет получать высококачественную микроструктуру.

В производстве мощных быстродействующих транзисторов типичной задачей является получение Т-образных структур. В транзисторах с высокой

CABL-UH. The T-gate is useful for high-power and high-speed transistors. A large massive metal sits on a wire. Both are electrically connected each other. The cutting cross section looks a tee shape. The massive metal transmits a high frequency signal while the wire depletes electron in a high electron mobility transistor (HEMT). This pattern usually needs a several steps of exposure but we offer a single step of the lithography method with CABL-UH.

A ZEP-520A resist covers a bare surface of a wafer. Buffer layer of a Polymethylglutarimide (PMGI)

resist separates two ZEP-520A layers. Using different development method for each ZEP-520A layer, we can form a step structure by changing the dose times. We expose a stronger dose at the center of a line, and the wafer surface shows up. The electron beam is restricted as 20 pA, which allow us to fabricate so narrow gate width as 50 nm. The top layer of a ZEP-520A resist is developed by a commercial liquid developer. The bottom layer of a ZEP-520A resist can be influenced with the same liquid but is still protected by a buffer layer resist of PMGI. After developing the buffer layer,

the critical layer of ZEP-520A is finally removed (fig.4b). After proper etching treatment of surface cleaning, we can deposit gate metals.

SUMMARY

Crestec developed an EBL system, CABL-UH series with high resolution, high stability and high reliability. Writing results for both negative- and positive-tone resists show that CABL-UH has potential in a wide range of application fields such as FET devices, MOS devices, photonic crystals, optical modulators, nano-imprint molds and HEMT. ■

подвижностью электронов (НЕМТ) верхняя часть такой структуры образуется металлическим массивом, который служит для передачи высокочастотного сигнала и соединен с тонкой проволокой. В традиционной технологии для получения такой структуры необходимо провести несколько экспонирований, а САВЛ-УН позволяет обойтись одной операцией.

При подготовке материала для эксперимента два слоя резиста ZEP-520A были разделены буферным слоем из полиметилглутаримида (PMGI). Используя различные режимы проявления слоев резиста, можно сформировать ступенчатую структуру. Вначале было выполнено экспонирование центральной линии, при котором резист был удален до поверхности пластины. Уменьшение тока луча до 20 пА позволило сформировать элемент шириной 50 нм. Проявка верхнего слоя резиста выполнялась с использованием обычных химикатов, затем был удален буферный слой, затем – нижний слой ZEP-520A (рис.4b). После обработки поверхности полученная структура будет готова для нанесения функциональных покрытий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Система САВЛ-УН характеризуется сочетанием высокого разрешения, стабильности и надежности. Проведенные эксперименты показали, что при использовании и позитивных, и негативных резистов САВЛ-УН может эффективно использоваться в производстве полевых и НЕМТ-транзисторов, МОП-систем, фотонных кристаллов, оптических модуляторов, штампов для наноимпринтинга.

ЛИТЕРАТУРА

1. Okino T. et al. 130 kV High-Resolution Electron Beam Lithography System for Sub-10-nm Nanofabrication. Japanese Journal of Applied Physics 52, 06GB01, 2013.

В ОЭЗ "АЛАБУГА" ОТКРЫТ ЗАВОД ПО ПРОИЗВОДСТВУ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА

15 мая в особой экономической зоне "Алабуга" (Республика Татарстан) состоялось открытие завода "Алабуга-Волокно" по производству углеродного волокна, построенного холдинговой компанией "Композит" по заказу Госкорпорации "Росатом". В торжественной церемонии приняли участие президент Республики Татарстан Рустам Минниханов, первый заместитель генерального директора ГК "Росатом" Александр Локшин, генеральный директор ХК "Композит" Леонид Меламед, директор департамента химико-технологического и лесопромышленного комплекса Министерства промышленности и торговли РФ Владимир Потапкин, генеральный директор ОЭЗ "Алабуга" Тимур Шигаев.

Предприятие начнет работу с выпуска промышленных партий углеродного волокна марки Umatex UMT42-12K. Мощность "Алабуга-Волокно" – не менее 1,7 тыс. тонн ежегодно, с потенциалом до 2 тыс. тонн. Это полностью покрывает потребности в углеродном волокне российского рынка, емкость которого в настоящее время составляет 500 тонн. При этом объем мирового рынка достигает 60 тыс. тонн в год. В дальнейшем есть планы установить еще четыре технологические линии, что позволит выпускать до 10 тыс. тонн волокна ежегодно. Ожидается, что выход предприятия на полную мощность позволит России занять 2% мирового рынка углеродного волокна. Стратегическая цель – занять не менее 7% мирового рынка углеволокна к 2020 году.

Углеродное волокно в составе легких и прочных композиционных материалов востребовано в атомной промышленности, космической индустрии, авиастроении, автомобилестроении, энергетике, судостроении, нефтегазовой отрасли, строительстве.

"Пуск нового завода "Алабуга-Волокно" – это важный шаг в реализации программы импортозамещения. Если еще недавно большая часть российских потребностей в углеродном волокне закрывалась за счет импорта, то теперь есть возможность не только обеспечивать собственные нужды, но и появляются реальные перспективы выхода на мировой рынок", – прокомментировал открытие завода А.Локшин.

"Выход предприятия на полную мощность позволит совершить настоящий прорыв в области композиционных материалов в России. Мы готовы обеспечить высококачественной продукцией российский рынок и достойно конкурировать на международном", – отметил Л.Меламед.

ХК "Композит"