

Янин Е.П., Бессонов В.В. Использование ртути в полупроводниковой промышленности и ее эмиссия в среду обитания // Ресурсосберегающие технологии, 2007, № 4, с. 17-27.

В настоящее время основное использование ртути в полупроводниковой промышленности связано с производством полупроводниковых материалов и созданием на их основе современных электронных и электронно-оптических приборов.

В свое время в СССР применение ртути в технологии производства полупроводниковых материалов и в качестве акцепторной примеси для легирования германия (используемого в инфракрасной технике) с целью придания ему дырочного типа проводимости началось в 1950-х гг. Уже в 1970-х гг. в ГОИ им. С.И. Вавилова (г. Санкт-Петербург) были изготовлены фотоприемники (ФП) и фотоприемные устройства (ФПУ) с чувствительными элементами из германия, легированного ртутью [10]. Первые работы, посвященные изучению оптических свойств монокристаллов полупроводникового материала на основе кадмий-ртуть-теллур, получившего в нашей стране аббревиатуру КРТ, относятся к 1963-1964 гг. [15]. С 1969-1970-х гг. твердые растворы на основе соединений типа A^2B^6 , в том числе КРТ, стали приобретать все более широкую практическую ценность.

Сейчас полупроводниковые материалы на основе соединений типа A^2B^6 , содержащих ртуть, в той или иной степени используются при изготовлении фоторезисторов, фотодиодов, датчиков Холла, высокочувствительных приемников оптического излучения (фотоприемников, фотоприемных устройств и комплексов), полупроводниковых лазеров; они являются средствами для создания фотосопротивлений, перестраиваемых лазеров широкого диапазона длин волн; термоэлектрических преобразователей энергии; элементов интегральной оптики и светофильтров инфракрасного (ИК) диапазона.

Свойства и применение ртутьсодержащих полупроводниковых материалов

Физические свойства соединений типа A^2B^6 , представляющих собой узкозонные полупроводники с высокой подвижностью электронов, в значительной мере определяются содержанием собственных точечных дефектов структуры, имеющих низкую энергию ионизации и проявляющих высокую электрическую активность [26]. Первое время в качестве ртутьсодержащих полупроводниковых материалов чаще всего употреблялись HgS , $SeHg$, $TeHg$ [11, 14, 17]. Затем было установлено, что многие соединения типа A^2B^6 образуют между собой непрерывный ряд твердых растворов, типичными представителями которых являются $Cd_xHg_{1-x}Te$, $Cd_xHg_{1-x}Se$, $CdTe_xSe_{1-x}$, $Hg_{1-x}Mn_xTe$, $Hg_3In_2Te_6$, обладающие уникальными электрофизическими характеристиками [10, 19, 20]. Среди этих соединений особый интерес представляют твердые растворы теллуридов кадмия и ртути (Cd-Hg-Te), получившие в нашей стране, как уже сказано, аббревиатуру КРТ [3-5, 10].

Смесь Cd-Hg-Te (КРТ) при определенных условиях образует кристаллы со структурой сфалерита, в которых одна подрешетка целиком занята атомами теллура, а в другой располагаются атомы кадмия и ртути [21]. В зависимости от пропорции, в которой смешаны атомы кадмия и ртути в подрешетке металла, могут быть получены кристаллы КРТ с любой заданной шириной запрещенной зоны в интервале 0-1,6 эВ (при 4,2 К). Наиболее важное практическое значение из КРТ имеют твердые растворы $Cd_xHg_{1-x}Te$. В СССР твердый раствор КРТ был впервые (практически одновременно с учеными Великобритании) синтезирован и исследован А.Д. Шнайдером (Львовский университет) [27].

Основными причинами широкого практического использования КРТ ($\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$), прежде всего, в инфракрасной технике (ИК-технике) явились его уникальные электрофизические характеристики [21, 23, 27]:

- возможность получения полупроводникового материала с оптимальными свойствами для приема излучения в необходимом спектральном диапазоне простым изменением соотношения кадмия и ртути (при $x \sim 0,4$ мы имеем фоточувствительность в диапазоне длин волн 1,5-2,5 мкм, при $x \sim 0,3$ – 3-5 мкм, при $x \sim 0,2$ - 8-12 мкм);

- возможность выращивания как объемных монокристаллов, так и эпитаксиальных слоев КРТ *n*- и *p*-типов проводимости высокого структурного совершенства и с хорошими электрофизическими характеристиками;

- возможность создания фоторезисторов и фотодиодов, в том числе сверхбыстродействующих и матричных, с предельно высокими параметрами;

- коэффициент теплового расширения КРТ близок к его значению у кремния, что позволяет легко решать проблему стыкования крупноформатных матриц фоточувствительных элементов из КРТ с матрицами кремниевых ключей и мультипликаторов в матричных ФПУ, работающих при многократном охлаждении вплоть до 80 К;

- КРТ, будучи прямозонным полупроводником при всех составах, позволяет создавать не только ФПУ, но и светоизлучающие устройства, вплоть до инжекционных лазеров;

- именно на КРТ успешно были реализованы три ключевых элемента твердотельной электроники: *p-n*-переход, транзистор со структурой металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) и барьер Шоттки.

В СССР разработка методов выращивания КРТ и изготовление фотодиодов и фоторезисторов на его основе осуществлялись главным образом в НИИПФ (ныне ГНЦ «НПО «Орион», г. Москва) [23]. Уже в 1970 г. на основе КРТ производились одноэлементные фоторезисторы, которые поставлялись во многие организации СССР. Несколько позже начались разработки фоторезисторов на заводе «Сапфир», где затем было организовано серийное производство первого в СССР ФП на основе КРТ [23]. Достаточно быстро методы выращивания КРТ с использованием разработок ФТИ АН СССР, НПО «Орион», НПО «ГИПО» (г. Казань), Института полупроводников АН Украины были развиты и доведены до серийного производства в НПО «Гиредмет» (г. Москва) и внедрены на Заводе чистых металлов (ныне принадлежит ОАО «Чистые металлы», г. Светловодск, Кировоградская обл., Украина, промышленное производство чистых компонентов и монокристаллов твердых растворов КРТ здесь начато в 1978 г.) и Опытном химико-металлургическом заводе (г. Подольск) [10, 19, 32]. Завод чистых металлов в Украине к середине 1980-х гг. производил объемные монокристаллы КРТ нужной кондиции и в необходимом количестве. В настоящее время «Завод чистых металлов» производит КРТ в виде слитков, пластин (со стороной 10-30 мм, толщиной 0,7-1 мм), эпитаксиальных структур (размер рабочей поверхности 10 мм x 10 мм, толщина слоя 15-30 мкм). Завод в г. Подольске выпускает материал для двумерных фотоприемных структур фотодиодного типа и фотоматриц, представляющих собой тонкие пленки КРТ на полупроводниковых подложках [10]. В настоящее время в НИИКИ ОЭП (Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов, до 1990 г. - филиал ГОИ) осуществляются работы в области технологии получения эпитаксиальных слоев и структур КРТ методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений [34]. Научные исследования полупроводниковых кристаллов КРТ проводятся в Институте теплофизики СО РАН, в Физико-техническом институте им А.Ф. Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург) и др. [13]. В ОАО «Сапфир» (г. Москва) разработано охлаждаемое ФПУ на основе КРТ с одним фоточувствительным элементом и массой изделия 300 г [33].

В последние годы на основе КРТ создаются матрицы фоточувствительных элементов, являющихся составной частью ФП, одиночных, линейных и матричных ФПУ, чувствительных в

диапазоне длин волн 1-20 мкм [3-5, 10, 19, 20, 25]. Фотодиоды из $Cd_xHg_{1-x}Te$ сейчас стали основным фоточувствительным элементом современной ИК-техники, приборов для приема импульсов CO_2 -лазера и др. Полупроводниковые лазеры и ФП на основе КРТ являются важнейшими составляющими элементной базы волоконно-оптических линий связи. На основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ изготавливаются неохлаждаемые фоторезисторы, тепловизоры-дальномеры, теплопеленгаторы-дальномеры и т. д. При изготовлении датчиков Холла наилучшие результаты достигаются при использовании твердых растворов $HgSe$ и $HgTe$ в виде пластинок или тонких пленок. Одним из перспективных материалов для изготовления неохлаждаемых полупроводниковых детекторов является диодид ртути (HgI_2) [8, 9].

В последние годы в мире интенсивно развивается производство ФП и ФПУ, являющихся основой инфракрасных систем (ИК-систем) для гражданских применений и военного назначения [20]: круглосуточная навигация транспортных средств, контроль промышленных процессов, глобальный экологический мониторинг суши и океана, системы переднего обзора (FLIR) авиации и сухопутных объектов, системы захвата целей (TAS), системы поиска и сопровождения различных целей (IRST), тепловизоров для пожарных и автомобилистов и многое другое. В общем количестве ИК-систем военного назначения около 40% занимают системы переднего обзора, на основе которых строится большинство обзорно-навигационных и обзорно-прицельных систем военно-воздушной, военно-морской и сухопутной техники. В гражданской отрасли в общем количестве ИК-систем около 35% используются в сфере охраны окружающей среды, около 25% – в промышленном контроле, около 20% – охрана безопасности, около 17% – транспорт, около 5% – медицина [20].

Твердые растворы КРТ в объеме выпуска ИК-фотоприемников в диапазонах длин волн 3-4 и 8-12 мкм занимают лидирующее положение [6]. ИК-фотоприемники на основе КРТ различного состава обеспечивают регистрацию ИК-излучения в широком диапазоне длин волн (1-20 мкм и более). В свою очередь, использование различных физических процессов дает возможность конструировать на основе КРТ различные типы ИК-фотоприемников, работающих в широком интервале температур (от температуры жидкого азота до комнатной). Особенно перспективны пластины из КРТ, в том числе, для создания фотоматриц на основе жидкофазных пленок КРТ, крупноформатных ФПУ, фотоматриц с чувствительными фотодиодными элементами. По оценкам [27, 28], в настоящее время более двух третей всех изделий ИК-техники используют ФП на основе КРТ. Так, в области военных применений на основе КРТ изготавливается около 50% всех ФП для тепловидения на области спектра 8-12 мкм, в гражданском секторе – примерно 12% [20]. Особенно широкое развитие получили технологии ФП на основе фотодиодов из КРТ для тепловизионной аппаратуры, работающей в режиме временной задержки и накопления либо в «смотрящем» режиме.

В связи с появлением в промышленности нового поколения ФПУ, прежде всего матричных и субматричных на основе КРТ, началось активное освоение тепловизионных приборов второго поколения со значительно улучшенными чувствительностью и пространственным разрешением, включая фотоэлектронные приборы для регистрации быстропротекающих процессов. В частности, известны разработки ГНЦ «НПО «Орион», представляющие собой матричные ФП на основе $CdHgTe$ (с числом элементов более 110000) [20].

Специалисты считают, что лидирующая роль КРТ в развитии тепловидения будет сохраняться еще достаточно долго [7, 10, 13]. В любом случае быстродействующие охлаждаемые ФП на основе КРТ все еще остаются незаменимыми для многих видов оптико-электронных систем вооружения и гражданского назначения. В последние годы были получены новые твердые растворы, которые рассматриваются в качестве альтернативы КРТ, например, твердый раствор (теллурида марганца)-(теллурида ртути) $Mn_xHg_{1-x}Te$ (МРТ) [16].

Очень перспективными считаются новые ртутьсодержащие сверхпроводники (РССП) с общей формулой $HgBa_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+2+d}$, которые к настоящему времени обладают рекордными тем-

пературами перехода в сверхпроводящее состояние ($T_c=135$ К) [2]. Более того, под внешним давлением выше 200 тыс. атм. критическая температура этого соединения превышает 160 К, что всего на 25 К меньше температуры, зарегистрированной на поверхности Земли. Относительная простота строения РССП, стабильные степени окисления для всех катионов кроме меди, возможность изменять кислородную стехиометрию и температуру перехода в сверхпроводящее состояние в широком диапазоне обуславливают интерес к исследованию этих соединений для понимания высокотемпературной сверхпроводимости. РССП очень привлекательны и с точки зрения их практического использования и представляют большой интерес для современной технологии.

Технологии получения ртути содержащих соединений типа A^2B^6

Материалы электронной техники получают с помощью химико-технологических процессов, состоящих из ряда элементарных физических, физико-химических и химических процессов (операций), которые складываются из следующих основных стадий [24]: 1) подготовки сырья и подвода регулирующих компонентов в зону реакции; 2) химических превращений (реакций); 3) отвода из зоны реакции полученных продуктов и выделения целевого продукта. Необходимым условием достижения высоких электрофизических характеристик полупроводниковых материалов является их глубокая очистка от посторонних примесей. Получение особо чистых полупроводниковых соединений осуществляют синтезом из элементов, прошедших глубокую очистку. В общем случае очистку полупроводниковых материалов и их компонентов обычно ведут в две стадии [24]. На первой стадии компоненты этих материалов переводят в промежуточные химические соединения и производят их очистку, используя различные процессы. На второй стадии производят восстановление компонентов из промежуточных соединений с последующей их очисткой. Применяют способы, основанные на тех же процессах, эффективность которых в отдельных случаях резко возрастает при работе с более чистыми компонентами. Обычно способ выбирается исходя из физико-химических свойств компонента, качества получаемого материала и производительности процесса.

Получение высококачественного КРТ связано с большими трудностями и является весьма дорогостоящим делом. Еще недавно для того, чтобы получить КРТ нужного качества, плавку и охлаждение материала осуществляли длительное время, иногда до полугода. При этом полезный выход продукции, то есть отношение конечного продукта к его исходным компонентам, был не очень высоким. Во многом это связано с тем, что КРТ характеризуется сложным комплексом физико-химических свойств, одно из которых определяется резким различием плотности компонентов КРТ – теллуридов кадмия и ртути [10]. При плавлении поликристаллического материала более тяжелый компонент – теллурид кадмия – собирается в нижней части контейнера и слиток оказывается неодинаковым по длине, причем состав 22% по кадмию получается только в узкой части слитка. Гравитационная ликвация, так названо явление расслаивания КРТ, может быть устранена кристаллизацией в условиях орбитального полета [10]. Действительно, в свое время на орбите проводились эксперименты с КРТ, в ходе которых кварцевые ампулы с поликристаллическим КРТ помещались в капсулы из нержавеющей стали, между капсулой и ампулой помещалась капля ртути. Давление ее пара уравнивало давление в ампуле, и тем самым возможность взрыва исключалась. При медленном снижении температуры в утонченном конце ампулы начиналась кристаллизация, и ее фронт продвигался по ампуле. Тем не менее в настоящее время обычная земная технология уже приблизила монокристаллы КРТ к требуемым свойствам [10].

В первые годы своего практического применения монокристаллы соединений типа A^2B^6 выращивали в основном из газовой фазы и из расплавов [12, 18, 29]. Синтез соединений, имеющих большое давление паров летучего компонента над расплавом, осуществляли в камерах высокого давления. В частности, монокристаллы теллурида ртути получали в полукристаллическом виде

сплавлением исходных компонентов (в вакуумированных и запаянных кварцевых ампулах). В случае если при выращивании монокристаллов не удавалось сразу получить соединение требуемого стехиометрического состава, то кристаллы, например $Cd_xHg_{1-x}Te$, разрезали на пластины, которые подвергали дополнительному отжигу в парах недостающего компонента. Выращивание кристаллов из газовой фазы производят на специальных установках [24]. При получении монокристаллов соединений типа A^2B^6 газо-фазным методом обычно использовали схему с применением затравок, позволяющую регулировать в процессе роста стехиометрию монокристаллов химических соединений. Контролируемое осаждение пара на затравочный кристалл позволяет осуществить выращивание достаточно крупных (до 100 мм в диаметре) кристаллов с заданными химическим составом и стехиометрией. Обычно скорость роста монокристаллов из газовой фазы и велика и составляет $10^{-2} - 1$ мм/ч.

Первый промышленный способ получения слитков КРТ заключался в закалке соответствующего расплава и последующем длительном рекристаллизационном отжиге, в результате которого удавалось сформировать крупноблочный поликристалл КРТ, вполне пригодный для изготовления одиночных ФП и небольших линеек [28]. Несколько позже монокристаллы КРТ стали выращиваться методом перекристаллизации из предварительно синтезированной шихты с непрерывной подпиткой зоны расплава из твердой фазы [4, 15, 19]. Выращенные кристаллы разрезались на пластины, которые подвергались механико-химической обработки и двухступенчатому отжигу в насыщенных парах ртути (финишная температура отжига $270^\circ C$). Этот метод применяется и в настоящее время. Используется также выращивание монокристаллов КРТ из газовой фазы. В данном случае предварительно проводится синтез соединений из элементарных Cd, Hg, Te. Затем методом химических транспортных реакций в замкнутой системе $Cd_xHg_{1-x}Te - NH_4Br$ получают пластинчатые монокристаллы размером $10 \times 10 \times 10$ мм³ при температурах зон источника 953 К и кристаллизации 833 К [19].

В последние годы широкое распространение получили полупроводниковые материалы в виде монокристаллических пленок КРТ на различных монокристаллических подложках. Такие пленки называются эпитаксиальными, а процессы их получения – эпитаксиальным наращиванием. Если эпитаксиальная пленка наращивается на подложку того же вещества, то получаемые структуры называются гомоэпитаксиальными; при наращивании на подложку из другого материала – гетероэпитаксиальными. Необходимость создания эпитаксиальных пленок КРТ, которые играют важную роль в современной оптоэлектронике, диктовалось двумя обстоятельствами [10]. Первое из них вытекало из желания сократить количество дорогостоящего материала, необходимого для изготовления соответствующих приборов. Вторая причина интереса к пленкам КРТ определялась требованиями технологии фотодиодов: только пленки можно разместить в тесно расположенных линейных структурах и тем более в двумерных матрицах. Особое значение имеют гетероструктуры $Cd_xHg_{1-x}Te / Si$ (пленки КРТ на подложках из кремния), используемые для изготовления фотодиодов, фоторезисторов, многоматричных ФПУ с засветкой через подложку. В настоящее время существует несколько технологий эпитаксиального наращивания пленок соединений типа A^2B^6 (включая КРТ), среди которых наиболее эффективными являются [10, 26]: а) жидкофазная эпитаксия, напоминающая процесс обычного лужения металла, б) эпитаксия с применением металлоорганических соединений, в) молекулярно-лучевая эпитаксия.

Методом жидкостной эпитаксии получают гомо- и гетероэпитаксиальные структуры на основе соединений типа A^2B^6 и их твердых растворов. В качестве растворителя обычно применяют расплав нелетучего компонента соответствующего соединения. Наращивание эпитаксиального слоя проводят либо в режиме программируемого снижения температуры, либо из предварительно переохлажденного расплава. В России наибольшее распространение получил метод жидкофазной эпитаксии, разработанный в НПО «Гиредмет» [3, 19]. Эпитаксиальные слои $p-Cd_xHg_{1-x}Te$ (состава $x=0,2-0,3$) диаметром 20-30 мм и толщиной 15-40 мкм выращиваются на подложках из Cd_1-

Zn_yTe ($y=0,02-0,05$) путем принудительного охлаждения раствора-расплава на основе теллура в интервале температур 510-470°C. Для уменьшения концентрации дырок слои подвергают отжигу в насыщенных парах ртути при температуре 340-360°C в течение 3-10 час. Считается, что метод создания эпитаксиальных слоев жидкофазной эпитаксией сейчас является наиболее технологически отработанным [19], а матричные ФП на эпитаксиальных слоях КРТ, выращенных методом жидкофазной эпитаксии, до недавних пор являлись самыми распространенными [3].

Перспективным и уже внедренным в практику методом выращивания эпитаксиальных структур соединений типа A^2B^6 является эпитаксия с применением металлоорганических соединений [10]. Ее преимущества заключаются в отсутствии в газовой среде хлорсодержащих компонентов, химически взаимодействующих с подложкой, в низких рабочих температурах, простоте аппаратного оформления, легкости регулирования толщины и состава эпитаксиальных слоев. Метод обеспечивает создание многослойных структур с тонкими, однородными по толщине слоями и резкими границами раздела и позволяет воспроизводимо получать слои толщиной менее 10 нм при ширине переходной области менее 1-5 нм. Обычно слои КРТ выращиваются в реакторе горизонтального типа. В Институте химии высокочистых веществ РАН (г. Нижний Новгород) высокочистые эпитаксиальные слои твердых растворов КРТ получают паро-фазным химическим осаждением из металлоорганических соединений [31]. Здесь разработаны способ и оборудование для получения монокристаллических эпитаксиальных слоев КРТ путем паро-фазного химического осаждения из паров ртути и металлоорганических соединений Cd и Te. Испытания опытных образцов получаемых слоев показали, что по степени чистоты и структурному совершенству они пригодны для изготовления ФП инфракрасного излучения. Институт имеет опытные участки по выпуску малых серий высокочистых веществ и материалов.

В последнее время все большее практическое использование получает метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) выращивания композиций соединений типа A^2B^6 и твердых растворов на их основе, в первую очередь соединений $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, когда в качестве подложек используются пластины GaAs с буферными слоями из CdZnTe [6]. МЛЭ превосходит другие методы выращивания пленок КРТ благодаря тому, что процессы осуществляются при более низких (180-190°C) температурах, чем в других методах. Процесс осуществляют в условиях глубокого вакуума (10^{-10} – 10^{-12} мм рт. ст.) при использовании молекулярных пучков (лучей) соответствующих элементов. Применение особо чистых исходных веществ, создание многокамерных установок с охлаждаемыми до низких температур и вращающимися держателями подложек позволяют резко повысить чистоту выращиваемых слоев и их однородность. Этим методом получают многослойные эпитаксиальные структуры со сверхтонкими слоями и наименьшей толщиной переходных слоев. Сейчас эта технология используется в промышленных масштабах, а производство многих современных приборов микро- и оптоэлектроники почти целиком базируется на ней [21]. В России в середине 1990-х гг. в ИФП СО РАН были созданы установки для синтеза пленок КРТ и получены эпитаксиальные пленки КРТ, которые нашли практическое применение в разработках ИФП СО РАН (г. Новосибирск) и в его совместной с заводом «Альфа» работе по изготовлению многоэлементного линейного ФПУ с элементами фоторезисторного типа [10].

Известно несколько установок, с помощью которых осуществляет процесс МЛЭ. Так, трехкамерная установка МЛЭ типа «Обь», модифицированная для работы с ртутью (ИФП СО РАН), имеет три технологических камеры, отличающиеся составом остаточных газов [3]: камеру предэпитаксиальной подготовки подложек, которая не имеет молекулярных источников и в которой производится термообработка подложек при необходимой температуре; камеру выращивания буферных слоев, состоящих из халькогенидов элементов 2-й группы; камеру выращивания узкозонных Hg-содержащих твердых растворов, оснащенную специальной системой молекулярных источников (давление паров ртути в камере порядка 10^{-4} Па). Непосредственно после выращивания пленки имеют *n*-тип проводимости. Материал *p*-типа проводимости получается термообработкой в

ампулах, заполненных гелием, в двухзонной печи. Одна зона предназначалась для нагрева резервуара с ртутью, другая – для нагрева образца. Установка предназначена для выращивания КРТ в целях создания многоэлементных ФПУ дальнего инфракрасного диапазона длин волн. Разработчиком и держателем технологии молекулярно-лучевой эпитаксии является Институт физики полупроводников РАН [1]. К настоящему времени создано 35 установок, около половины из которых находится в ИФП РАН, остальные были поставлены в учреждения страны [1].

В последние годы в ИФП СО РАН разработано и изготовлено оборудование с автоматизированной системой управления технологическими процессами и средствами контроля качества слоев КРТ в процессе их роста (*in situ*), ориентированное на промышленное производство материалов, используемых для изготовления одиночных и многоэлементных фоторезисторов и фотодиодов, создания многоэлементных ФПУ ИК излучения [6, 22, 35]. Основой является установка МЛЭ «Катунь», модернизированная для работы с ртутью и включающая три технологических камеры, три камеры загрузки-выгрузки и ламинарный обеспыленный блок.

Потенциальная эмиссия ртути при производстве полупроводниковых материалов

Информация о масштабах использования ртути при производстве полупроводниковых материалов как в России, так и в других странах мира не публикуется, по крайней мере, в доступной литературе она отсутствует. По сведениям, полученным от работников ртутных комбинатов быв. СССР, упомянутый выше Завод чистых металлов в 1980-х гг. ежемесячно приобретал до 300 кг ртути. Следует отметить, что это был период активного производства объемных кристаллов КРТ и, очевидно, проведения опытных работ по внедрению новых методов получения этого материала. Учитывая выше приведенные материалы (о числе предприятий и организаций, предлагающих к продаже КРТ и изделия на его основе, о количестве установок по синтезу КРТ, исследовательские и опытно-конструкторские работы в совершенствовании ртутьсодержащих полупроводниковых материалов и др.), можно (с очень высокой степенью условности) оценить потребление ртути в производстве полупроводниковых материалов в современной России в интервале 0,5-2 т/год.

Практически отсутствуют также и данные об экологических аспектах получения ртутьсодержащих полупроводниковых материалов. Априори можно предположить, что процессы изготовления указанных материалов высокотехнологичны, проводятся в замкнутом объеме и, как подчеркивают авторы многих публикаций, не имеют вредных выбросов. Кроме того, такие производства отличаются высоким уровнем утилизации и повторного использования материалов, участвующих в технологическом процессе. В частности, на веб-сайте ОАО «Чистые металлы» (г. Светловодск) сообщается, что Светловодский завод чистых металлов является единственным в СНГ специализированным предприятием, работающим по принципу замкнутого технологического цикла от сырья до готовых изделий с глубокой переработкой отходов полупроводникового производства и утилизацией неперерабатываемых остатков [32].

В то же время в некоторых публикациях подчеркивается, что «эпитаксия КРТ требует больших расходов и утилизации токсичной ртути» [28], хотя масштабы указанных расходов металла не сообщаются. Известно, что в технологии КРТ огромную роль играют не только выращивание ртутьсодержащих соединений, но и послеростовые термообработки полученного материала в атмосфере ртутного пара. Поэтому не исключено, что в ходе синтеза полупроводниковых материалов происходит не только загрязнение камер используемой системы ртутью, но и ее поступление в производственную среду, например, из-за нарушений герметичности используемого аппаратного оборудования, на что указывают косвенные данные и некоторые прямые сообщения о «наличии течи в системе», о «газовыделении тиглей» и др. В ИФП СО РАН и КТИПМЭ СО РАН (г. Новосибирск) разработан и запатентован способ сбора ртути в технологической камере установки МЛЭ и сконструирована соответствующая установка [30]. Указанный способ и используемая для его осу-

ществления установка, как сказано в патенте, повышают эффективность технологии получения многослойных тонкопленочных покрытий, увеличивают производительность процесса и обеспечивают экологическую чистоту производства.

Судя по всему, из всего объема используемой при изготовлении полупроводниковых материалов ртути определенное количество ее входит в состав конечной продукции, небольшое количество эмитируется в производственную среду, а основная масса улавливается, утилизируется, рафинируется и повторно используется в производстве.

Литература

1. *Асеев А.Л.*
2. *Антипов Е.В., Путилин С.Н.*
3. *Бовина Л.А. и др.*
4. *Бовина Л.А., Стафеев В.И.*
5. *Бовина Л.А., Стафеев В.И., Болтарь К.О.*
6. *Варавин В.С., Гутаковский А.К., Дворецкий С.А.*
7. *Васильев В.В. и др.*
8. *Гайтер В.А., Залетин В.М., Фомин В.И.*
9. *Залетин В.М., Мельников А.Л., Ножкина И.М., Фомин В.И.*
10. *Курбатов Л.Н.*
11. *Мейлихов Е.З., Лазарев С.Д.*
- 12.
13. *Мынбаев К.Д., Иванов-Омский В.И.*
14. *Нашельский А.Я.*
15. *Несмелова И.М.*
16. *Несмелова И.М.*
17. *Пасынков В.В., Сорокин В.С.*
18. *Полупроводниковые соединения...*
19. *Пономаренко В.П., Филачев А.М.*
20. *Пономаренко В.П., Филачев А.М.*
21. *Свиташев К.К., Чикичев С.И.*
22. *Сидоров Ю.Г. и др.*
23. *Стафеев В.И.*
24. *Таиров Ю.М., Цветков В.Ф.*
25. *Филачев А.М., Пономаренко В.П., Таубин И.И., Ушакова М.Б.*
26. *Химическая энциклопедия...*
27. *XVI Международная конференция по...*
28. *Чикичев С.И.*
29. *Электрорадиоматериалы..*
- 30.
- 31.
- 32.
- 33.
- 34.
- 35.