

МЕТОД СОЗДАНИЯ МИРА

К 100-ЛЕТИЮ ОТКРЫТИЯ МЕТОДА ЧОХРАЛЬСКОГО И 60-ЛЕТИЮ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕРВОГО КРИСТАЛЛА ГЕРМАНИЯ В РОССИИ

А. Наумов¹

УДК 546.289:621.315
ВАК 05.27.06

Немного найдется в мире фамилий, которые на слуху так, как имя профессора Яна Чохральского – польского исследователя-металлурга и ученого. По некоторым сведениям, 31-летний Ян Чохральский, работавший тогда в Берлине в компании AEG (Allegmenete Electricitats-Gesellschaft), открыл свой знаменитый метод в 1916 году, когда уронил ручку в тигель с расплавленным оловом. Извлекая предмет из тигля, он обнаружил, что вслед за пером тянется нить застывшего олова. Чохральский установил, что образующаяся таким образом металлическая нить имеет монокристаллическую структуру. Может быть, это очаровательная легенда. Но в экспериментах, проведенных Чохральским, были получены монокристаллы металлов размером около одного миллиметра в диаметре и до 150 см длиной. Исследователь изложил суть своего открытия в статье "Новый метод измерения степени кристаллизации металлов", опубликованной в немецком журнале *Zeitschrift für Physikalische Chemie* в 1918 году. Академически правильнее было бы отметить 100-летие знаменитого метода в 2018 году. Но причины, побудившие обратиться к этой теме сегодня, станут ясны из публикации.

Сегодня метод Чохральского, как сообщают энциклопедии, "это способ выращивания монокристаллов вытягиванием их вверх от свободной поверхности расплава, находящегося в тигле, с запуском кристаллизации путем приведения затравочного кристалла заданной структуры и кристаллографической ориентации в контакт со свободной поверхностью расплава". Получаемый монокристалл постепенно вытягивают из расплава.

При выращивании монокристалла его внешняя форма определяется взаимодействием симметрии вещества и внешнего поля. В результате взаимодействия теплового поля, поверхностного натяжения, вращения слитка растущий кристалл имеет внутреннюю симметрию, присущую данному веществу, но внешняя форма цилиндрическая. Температура регулируется, как правило, путем изменения мощности нагревателя, который окружает тигель. Кристалл и фронт кристаллизации в процессе получения не контактируют с тиглем, что обуславливает высокое качество выращиваемого кристалла и его чистоту. Поверхность расплава доступна для выполнения различных технологических приемов (легирова-

¹ Государственный институт редких металлов Гиредмет, старший научный сотрудник, эксперт аналитического центра при правительстве РФ по модернизации и технологическому развитию экономики России, naumov_arkadii@mail.ru.



Ян Чохральский



Генри Уолтер



Гордон Кидд Тил

ния, подпитки), возможно прямое наблюдение за процессом и вмешательство вплоть до повторения процесса в случае неудачного начала. За все это и ценится метод Чохральского.

В настоящее время более половины технически важных кристаллов выращивают из расплава методом Чохральского, например, элементарные полупроводники и металлы, оксиды, галогениды, халькогениды, вольфраматы, ниобаты и другие вещества. Без преувеличения еженедельно в мире в сотнях появляющихся статей, посвященных проблемам материаловедения, имя профессора упоминается тысячи раз. Еще сложнее описать все области применения метода сегодня, когда электроника, оптоэлектроника, лазерная и космическая техника и многое другое базируется на кристаллах, выращенных методом Чохральского.

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ МЕТОДА

В 20–30-х годах прошлого века исследователи в Германии и США использовали метод Чохральского в его первоначальном варианте для получения тонких монокристаллов различных металлов: Al, Pb, Zn, Sn, Cd, Bi. При этом уже в 1922 году

исследователь Е. фон Гомперц (E. von Gompertz) из Института Кайзера Вильгельма предложил обдуть растущий кристалл потоком азота для регулирования теплоотвода. В 1937 году сотрудник американской корпорации Bell Telephone Laboratories Генри Уолтер (Henry Walter) в опубликованной им работе описал получение кристаллов NaCl методом Чохральского, при этом он первым использовал кварцевый тигель для расплава, систему нагрева тигля до 900°C и предложил вращать затравку с кристаллом для устранения тепловой асимметрии

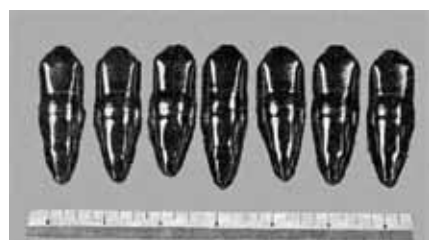


Рис.1. Первые монокристаллы германия (1948 г.)

системы. Метод стал приобретать черты современной технологии.

После того как в 1947 году физики Уолтер Браттейн (Wallter Brattain) и Джон Бардин (John Bardin) собрали первый точечный транзистор на поликристаллическом германии, огромные потенциальные возможности твердотельной микроэлектроники стали очевидны. Технология получения кристаллов германия для изготовления транзисторов начала развиваться быстрыми темпами. В 1948 году сотрудники той же Bell Labs Гордон Кидд Тил (Gordon K. Teal) и Джей-Би Литтл (J.B.Little) использовали метод Чохральского для выращивания первых монокристаллов (м/к) германия (рис.1).

В конце 1949 года к ним присоединился Эрни Бюлер (Ernie Buehler), который усовершенствовал первую лабораторную установку выращивания кристаллов методом Чохральского, и команда исследователей запатентовала различные варианты ее конструкции. Например, один из первых патентов на установку выращивания монокристаллов германия с разным типом легирования позволил получить монокристалл германия с p-n-переходом, на котором 12 апреля 1950 года Уильямом Шокли (W.Shockley) был получен первый плоскостной p-p-германиевый транзистор. Основные исторические вехи развития технологии выращивания м/к германия и кремния приведены в табл.1.

Таблица 1. Развитие технологии выращивания монокристаллов германия и кремния

Год	Компания	Достижение
1948	Bell Telephone Laboratories (США)	Первый монокристалл Ge
1951	Bell Telephone Laboratories (США)	Первый монокристалл Si
1956	Texas Instruments Inc. (США)	Первый монокристалл Si 100 мм
1956	Гиредмет, ИМЕТ им. Байкова АН	Первый кристалл Ge в СССР
1957	Гиредмет, Подольский ХМЗ	Первый монокристалл Si в СССР
1959	General Electric Research Lab	Первый б/д кристалл Si
1959–1960	ИМЕТ им. Байкова АН СССР	Первый б/д кристалл Si в СССР
1998	Umicore (Бельгия)	Первый б/д кристалл Ge 100 мм

Примечание: б/д – бездислокационный.

В 1949 году физики Уильям Пайтенпол (W.J.Pietenpol) и Рассел Ол (R.S.Ohl) создали первый транзистор из кремния, и в 1951-м те же Эрнест Бюлер и Гордон Тил (E.Buehler и G.K.Teal) вырастили первые монокристаллы кремния. Загрузка составляла от 50 до 100 г поликремния, вес выращенного кристалла 50–200 г, а диаметр первых слитков монокремния был равен 10–12 мм.

В 1952 году компания Bell Laboratories стала продавать лицензии на технологию производства транзисторов, центральным пунктом которой была технология получения монокристаллов кремния. Стоимость первой лицензии составляла 25 тыс. долл.

Первые монокристаллы кремния содержали дислокации в количестве $(1-2) \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$. Первый бездислокационный (б/д) кристалл был получен американцем Уильямом Дэшем (W.C.Dash) в 1958 году. В конце процесса затравления Дэш немного повысил температуру расплава, в результате чего диаметр растущего кристалла уменьшился и образовалась так называемая "шейка". Когда сечение "шейки" стало достаточно малым, он снизил температуру расплава до первоначального уровня и диаметр кристалла вновь увеличился. Этот прием позволил уменьшить количество дислокаций,

Таблица 2. Основные исторические вехи выращивания монокристаллов двойных соединений

Год	Компания	Достижение
1951–1952	Siemens-Schuchertwerke (ФРГ), ФТИ Иоффе (СССР)	Первый кристалл InSb
1954	Bell Telephone Laboratories (США)	Промышленный InSb, GaSb
1958	MIT (США)	GaAs
1958	Batelle Institute (США)	AlAs
1961	IBM Corp. (США)	Cd ₃ As ₂ , CdSb, ZnSb, ZnAs ₂
1961	General Electric Research Lab.	GaSb
1961	Air Research Cambridge Res. Lab.	Bi ₂ Te ₃
1971	Bell Telephone Laboratories (США)	GaAs из под флюса (LEC) 50 мм
1984	Westinghouse Corp. (США)	LEC GaAs 100 мм
1991	Little Airtron (США)	LEC GaAs 150 мм
2000	Freiburger Compound Materials GmbH	LEC GaAs 200 мм

переходящих в растущий кристалл из затравки за счет выхода дислокаций на поверхность кристалла. Приблизительно в то же время первый бездислокационный монокристалл кремния был получен в СССР М.Я.Дашевским в ИМЕТ им. Байкова АН СССР.



М.Я.Дашевский

Метод стремительно распространился на все области материаловедения в разных странах. В 1951–1952 годах одновременно в лаборатории Сименс-Шукертверке (Siemens-Schuchertwerke, ФРГ) исследователь Генрих Велкер (H.Welker) и в СССР в ФТИ им. Иоффе Н.А.Горюнова вырастили первые монокристаллы InSb в лабораторных условиях. В 1954 году в Bell Telephone Laboratories был получен полупромышленный монокристалл InSb. В 1957 году исследователь Дэвис (Davis) из компании Honeywell вырастил первый монокристалл Te, а в 1962-м Метц (Metz), Миллер (Miller) и Мезельски (Mezelsky) получили первый кристалл PbTe из-под слоя флюса В₂О₃, покрывавшего расплав. В 1958 году в Массачусетском технологическом институте (MIT) вырастили кристалл GaAs под давлением.

В 1959 году в ИМЕТ им. Байкова появились полупромышленные кристаллы InSb (М.С.Миргаловская, М.Р.Раухман). В 1965 году в английской лаборатории RSRE произошло важное событие – исследователь Джон Маллинз (J.Mullins) с коллегами получили кристалл GaAs из-под слоя флюса В₂О₃, что положило начало стремительному развитию СВЧ-электроники. Через несколько лет та же команда сообщила о получении первых кристаллов GaP и InP. В 1960 году исследователи Нассау (Nassau) и Ван Уйтерт (Van Uitert) в той же Bell Labs первыми вырастили оксидный монокристалл Nd:CaWO₄, используемый для изготовления лазеров, а в 1961 году –

Таблица 3. Основные исторические вехи выращивания оксидных кристаллов

Год	Компания	Достижение
1960	Bell Telephone Laboratories	CaWO ₄
1961	General Electric Research Lab.	Fe ₃ O ₄
1962	Raytheon Corporation	Y ₃ Fe ₃ O ₁₂
1964	Perkin Elmer Corp.	Y ₃ Al ₅ O ₁₂ , Ga ₃ Cd ₅ O ₁₂
1965	Westinghouse Res. Lab.	ZnWO ₄
1966	IBM Corp.	LiNbO ₃
1967	Litton Airtron Inc.	Al ₂ O ₃



Рис.2. Современная установка выращивания кристаллов методом Чохральского

CaF_2 . В 1967 году Кизер (Keezer) из компании Хегох вырастил первый монокристалл Se. Основные исторические вехи этого пути приведены в табл.2 и 3.

В 1964 году начались работы по автоматическому регулированию процесса выращивания кристалла. В отделении компании IBM в Нью-Йорке команда разработчиков Е.Патцер (E.J.Patzer), Р.Дессауэр (R.G.Dessauer) и М.Попониак (M.R.Poroniak) создали первую систему автоматического управления скоростью выращивания слитка кремния на основе ИК-оптической системы измерения диаметра кристалла. Система управления была создана к 1966 году, а в октябре 1967-го исследователи IBM опубликовали подробное ее описание. В 1970-х годах в США, Германии, Великобритании и СССР было создано несколько типов автоматизированных систем роста кристаллов с микропроцессорным управлением.

Современные ростовые установки (рис.2), предназначенные для выращивания кристаллов из расплава (Si, Ge, GaAs, $\text{Ga}_3\text{Gd}_5\text{O}_{12}$ и др.), оснащены системами регулирования, их основные параметры: темпера-

тура нагревателя и расплава, уровень расплава в тигле, а также диаметр кристалла. Температуру измеряют, как правило, пирометрами, для определения уровня расплава используют лазерные триангуляционные сенсоры или весовые системы, а для контроля диаметра выращиваемого кристалла – телевизионные или цифровые видеосистемы со средствами цифровой обработки данных. Процедура выращивания автоматизирована с момента затравления монокристалла и до окончания процесса. Также разработаны мощные математические модели моделирования процесса выращивания. Однако представляется, что сегодня, как и десятилетия назад, ученый, перед которым стоит задача впервые вырастить кристалл с новыми характеристиками, проведя моделирование, смотрит через окно камеры на поверхность расплава и надеется по-прежнему в основном на свой опыт, интуицию и терпение.

РАЗВИТИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ В СССР

С середины 1950-х годов развитие микроэлектроники в Советском Союзе по масштабу и результатам сопоставимо с разработкой атомного проекта и созданием ракетно-космического комплекса. В 1956 году методом Чохральского были выращены первые в СССР монокристаллы германия. Работы проводились одновременно в нескольких исследовательских институтах. Первые публикации появились в 1956 году в "Журнале физической химии" о лабораторных кристаллах германия, полученных в ИМЕТ им. Байкова АН СССР, работы были выполнены Д.А.Петровым и Б.Н.Калачёвым. Первые промышленные кристаллы в то же время были получены в Государственном институте редких металлов (Гиредмет, Москва).

Работы по полупроводниковым материалам в институте Гиредмет стартовали в 1947 году, когда была поставлена задача обеспечения начинающей свое развитие твердотельной электроники германием высокой степени чистоты. В 1951 году в Гиредмете создается специализированная лаборатория германия, которую возглавила Н.М.Эльхонес. На начальном этапе основное направление деятельности лаборатории – изучение сырьевых ресурсов германия в СССР и разработка технологий производства первичных германиевых концентратов и соединений германия высокой чистоты. Под научным руководством Н.П.Сажина были разработаны технологии извлечения германия из продуктов переработки коксующихся и энергетических углей, а также аргиллитов и железных руд. Это не только позволило удовлетворить потребности страны в отечественном германии, но и послужило основой для получения особо чистого германия, исходного продукта для выращивания монокристаллов методом Чохральского.

В Государственной производственной лаборатории (ГПЛ) – созданном в 1956 году подразделении Гиредмета, – которую возглавил Б.А.Сахаров, в том же году разработали промышленную технологию выращивания методом Чохральского монокристаллов германия и уже в июле получили первый промышленный монокристалл германия. Разработчики такой технологии – это всегда коллектив ученых, конструкторов и инженеров. Свою лепту в создание технологии выращивания как германия, так и кремния внесли Б.А.Сахаров, В.П.Гришин, М.Г.Мильвидский, Л.Г.Минаев, М.П.Чертков, Х.И.Макеев, В.М.Никитин, М.И.Иглицин и другие.

Одной из первых отечественных установок для выращивания германия стала лабораторная установка П-17, созданная в середине 1950-х годов. Тогда же появилась полупромышленная установка МК-1, на которой получали первые монокристаллы германия и кремния. Оборудование создавалось конструкторским отделом Гиредмета, КБ ЦМА и заводом Геоприборцветмет (конструктор В.Ю.Жвирблянский). Установками такого же типа был оснащен первый участок промышленного производства кремния на Подольском химико-металлургическом заводе. В Подмоскowie в 1957 году вырастили первый монокристалл кремния диаметром 15–20 мм и длиной до 150 мм (рис.3).



А.К.Дроздов

Вскоре появилась установка ВМ-2КМ (рис.4). Партия оборудования была установлена на Крас-

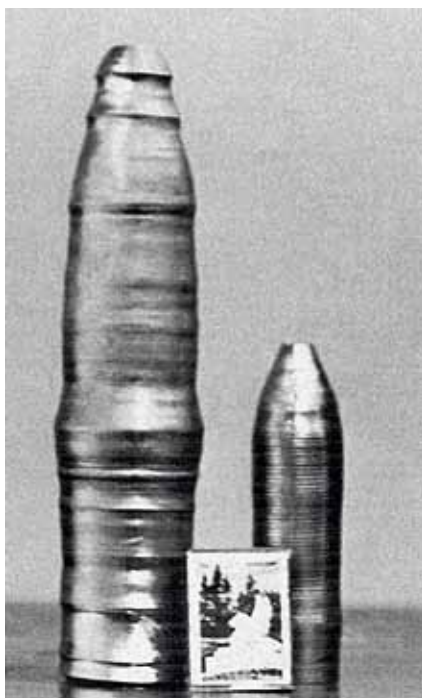


Рис.3. Один из первых монокристаллов Si в СССР

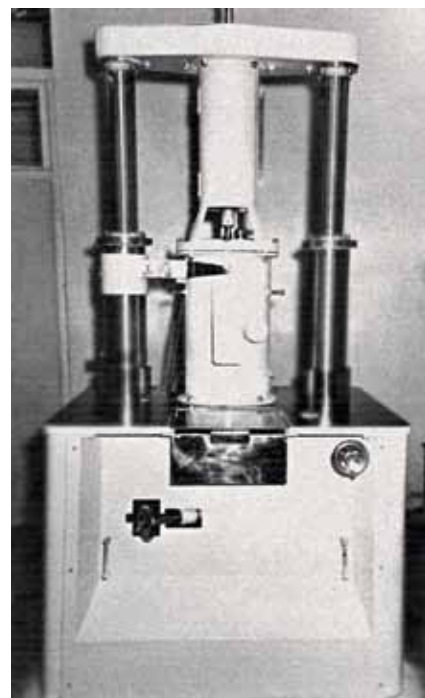


Рис.4. Установка для выращивания монокристаллов ВМ-2КМ

ноярском заводе цветных металлов, который стал вторым предприятием, обеспечивающим промышленный выпуск кремния и германия.

Создание установки "Редмет-1" в 1960 году положило начало линейке оборудования "Редмет" (табл.4). Совершенствование установок этой серии позволило увеличить загрузку с 0,5 до 150 кг ("Редмет-90").

При этом сформировалась уникальная конструкторская школа. Установками этой серии с середины 1960-х годов были оснащены все полупроводниковые предприятия СССР – Запорожский титано-магнийевый комбинат, Завод чистых металлов, Подольский химико-металлургический завод, Красноярский завод цветных металлов. Производства модернизировали для выращивания монокристаллов Si, Ge, GaAs, InP.

Таблица 4. Совершенствование установок серии "Редмет"

Наименование установки	Редмет-1	Редмет-8	Редмет-10	Редмет-15	Редмет-30М	Редмет-60	Редмет-90М
Год создания	1960	1965	1970	1983	1990	1998	2009
Масса загрузки, кг	0,5	2,5	8	20	45	60	150
Диаметр монокристалла, мм	40	50	80	100	150	200	300

Развитие отрасли выдвинуло плеяду крупных руководителей, таких как А.К.Дроздов, А.М.Тузовский, П.И.Рыжков, выдающихся инженеров и организаторов производства, в их числе Б.А.Сахаров, Х.И.Макеев, М.П.Чертков, блестящих ученых: М.Г.Мильвидского, М.Я.Дашевского, А.Я.Нашельского, Ю.М.Шашкова, В.В.Воронкова, А.М.Эйдензона, уникального конструктора В.Ю.Жвирблянского и многих других.

ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТОДА ЧОХРАЛЬСКОГО В МИРЕ Микроэлектроника

Одна из основных проблем, стоящих перед электроникой 21 века, связана с требованием увеличения количества обрабатываемой информации путем создания полупроводниковых интегральных схем, обеспечивающих более высокую степень интеграции на одном кристалле.

Несколько лет назад ведущие производители микросхем объявили о начале совместной работы по переводу производств на кремниевые подложки большего размера (рис.5). Переход на 450-мм подложки, как ожидалось, поможет производителям полупроводниковых устройств удовлетворять спрос на микросхемы, а также снизить производственные издержки в расчете на микросхему. Аналитики подсчитали, что новые подложки будут использоваться вместо применяемых сейчас многими крупными производителями полупроводниковых компонентов подложек размером 300 мм, при увеличении пластины стоимость каждого чипа падает. В начале 2013 года корпорация Intel продемонстрировала первые в мире полностью обработанные 450-мм подложки. Расчеты показывали, что при переходе с нынешних 300 на 450 мм экономия в конечном итоге составит около 30%, примерно так же, как произошло при переходе с 200 на 300 мм пластины.



Рис.5. Слиток кремния диаметром 400 мм

Сейчас очевидно, что ожидания были завышены, и это произойдет далеко не сразу, так как первоначально стоимость новых пластин будет значительно выше. Стоимость 1 см² подложки диаметром 450 мм сравняется с текущей ценой 1 см² подложки диаметром 300 мм не раньше 2025 года. А на начало использования обойдется в четыре-пять раз дороже.

Как ожидалось в начале десятилетия, 450-мм фабрики начнут работу в 2015–2017 годах, однако в конце 2013-го компания ASML, мировой лидер в области производства фотолитографического оборудования, приостановила инвестиции в 450-мм инструменты производства. Причина – неопределенность со спросом со стороны производителей микросхем. Фактически все новые производственные комплексы продолжают использовать 300-мм кремниевые подложки, а 450-мм пластины останутся экзотикой до конца десятилетия.

В нашу задачу не входит анализ всех технико-экономических проблем перехода отрасли на подложки большего диаметра по сравнению с используемыми сегодня. Видимо, это экономическая проблема целесообразности разработки и внедрения новых технологических линий. Представляется, что когда-нибудь этот переход произойдет: для одних типов микросхем – раньше, для других – позже. Следует отметить, что сегодня при выращивании кристаллов диаметром 400–450 мм преодолена, как когда-то для кристаллов диаметра 300 мм, большая часть фундаментальных материаловедческих проблем, связанных с поведением в слитке собственных точечных дефектов, кислорода, образования вакансий и т.д. По мере развития технологии промышленного выращивания методом Чохральского слитков диаметром 450 мм специалисты сталкиваются преи-



А.М. Тузовский



П.И. Рыжков



Х.И. Макеев



М.П. Чертков



М.Г. Мильвидский

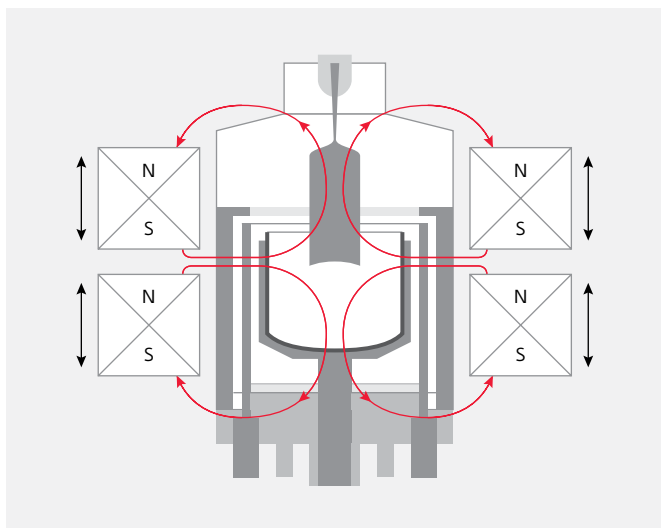


Рис.6. Схематическое изображение метода Чохральского с наложением на расплав магнитного поля (MCZ)

мощественно с технико-экономическими проблемами, такими как:

- повышенный риск нарушения кристаллической структуры из-за ускоренной коррозии тигля и повышения флуктуаций температуры в расплаве;
- большие потери материала при нарушении бездислокационного роста и скольжения дислокаций в бездислокационную область на расстояние, приблизительно равное диаметру кристалла;
- выращиваемый кристалл должен быть длиннее, чтобы обеспечить ту же долю годного материала (цилиндрическая часть) по отношению к конусам и тигельному остатку;
- увеличение ростового цикла за счет уменьшения скорости вытягивания, необходимого для минимизации термонапряжений и отвода тепла при кристаллизации, а также более продолжительные процессы загрузки и охлаждения кристалла.

Представляется, что при выращивании кремния электронного качества по мере увеличения диаметра кристалла (помимо большего размера установки, загрузки и теплового узла) будет еще более актуальной задача снижения дефектообразования в бездислокационных монокристаллах при их посткристаллизационном охлаждении. Одно из ключевых решений – повышение стерильности процесса выращивания и снижение содержания кислорода в выращенном кристалле, для чего в большинстве случаев используется наложение магнитного поля на расплав (рис.6). Управление потоками расплава позволяет контролировать содержание кислорода в области кристаллизации.

Солнечная энергетика

Для бурно развивающейся солнечной энергетики требование увеличения диаметра выращиваемого кристалла не столь экономически критично, как для микроэлектроники. Большинство получаемых сегодня монокристаллов имеют диаметр 200 мм, из них вырезаются квадратные элементы 156×156 мм, на основе которых собираются солнечные батареи любой площади. Однако критически важным является требование удешевления производства, так как метод Чохральского обходится дороже, чем, например, метод получения "мультикремния" с загрузкой 400–800 кг поликремния. Прогнозируется, что метод будет развиваться в сторону повышения производительности, в частности, путем совершенствования полунепрерывного метода выращивания – continuous CZ (CCZ). Из одного кварцевого тигля можно последовательно выращивать несколько монокристаллов (рис.7а). При этом нагреватель не выключают, а готовые кристаллы извлекают через шлюзовую систему. После каждого процесса тигель пополняют новой порцией материала. Разновидностью метода является использование двойного тигля, когда для дозагрузки во внешний тигель (рис.7б) используют гранулированный кремний, полу-

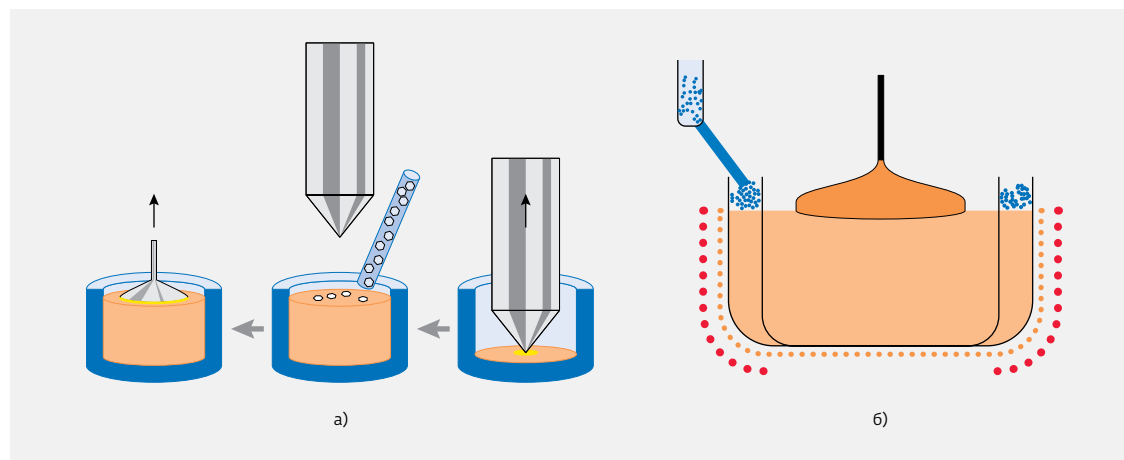


Рис.7. Схематическое изображение разновидностей метода полунепрерывного выращивания: последовательно из одного тигля (а), из двойного тигля (б)

чаемый путем пиролиза моноси-лана в "кипящем слое".

ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТОДА ЧОХРАЛЬСКОГО В РОССИИ

После катастрофического обрушения отечественной микроэлектроники в середине 1990-х годов предприятия Минцветмета (которым исторически принадлежали основные производители монокристаллов кремния и германия), МЭП и оборонной промышленности были лишены государственной и финансовой поддержки для ведения конкурентной борьбы с зарубежными поставщиками. К 1998 году доля отечественной электроники на внутреннем рынке значительно снизилась. Тем не менее базовые предприятия по выпуску монокристаллов и пластин (прежде всего кремния) смогли выжить, сохранить производство, разработать ряд новых технологий и даже оборудования, что не в последнюю очередь связано с научной и инженерной школой, заложенной в 1960-е годы.

Стоит отметить, что был сравнительно короткий период (примерно с 2003 по 2010 годы), когда российские и украинские предприятия по производству монокристаллов кремния, казалось, вписались в новый современный мир, их будущее не вызывало сомнений. В эти годы в мире начала бурно развиваться солнечная энергетика (преимущественно на основе кремния), чему способствовали субсидии государствами развитых стран, предоставляемые через льготные тарифы для производителей солнечной энергии. Такая форма поддержки "запустила" механизм развития экосистемы производства полупроводниковых материалов в мас-

Таблица 5. Характеристики отечественных промышленных установок выращивания монокристаллов кремния

Название установки	Масса загрузки, кг	Размеры кристалла, диаметр/длина, мм	Установленная мощность, кВт	Предприятие-разработчик
"Редмет-90М"	120	250/3000	200	Гиредмет (Москва)
РСМР CZ 1500/250	60	250/1500	150	ПХМЗ, НИИ "Изотерм" (Брянск)
"Кедр 221" УМК090	120	200/2080	180	Красмашзавод (Красноярск)
"Изотерм-20"	120	250/1600	150	НИИ "Изотерм" (Брянск)
УВК-300	160	310/2000	150	"Берег-Карбон" (Москва)

штабах, которых не знала традиционная электроника. Например, в настоящее время ежегодно выпускается около 250 тыс. тонн кристаллов кремния "солнечного" качества и только около 30 тыс. тонн "электронного". Спрос многократно превысил предложение, и каждый производитель кремния и России и на Украине нашел своих благодарных покупателей на Западе или в Юго-Восточной Азии. В этот период стали возможными даже конструирование и выпуск нового поколения современного ростового оборудования по методу Чохральского (рис.8а). За короткий период в начале 2000-х годов некоторые предприятия отрасли изготовили малыми сериями целый ряд установок. Все они в той или иной мере созданы на базе технических решений установки "Редмет-60". Характеристики последнего поколения отечественных промышленных установок выращивания монокристаллов кремния для солнечной энергетике приведены в табл.5.



Рис.8. Зал с установками выращивания УВК-300 (а), монокристалл кремния диаметром 300 мм (предприятие "УКМ-Синтез") (б)

Российские производители вырастили монокристаллы кремния 300 мм (рис.86).

Однако "этот благодатный Золотой век" достаточно быстро закончился. На Западе и на Востоке возникла новая отрасль – материаловедение и производство материалов солнечной энергетики. Темпы ее развития были таковы, что возникло перепроизводство. Сегодня накоплены избыточные мощности, примерно 30–50%, по всей технологической цепочке производства солнечных элементов. Потребность в продукции российских производителей на внешних рынках исчезла в одночасье.

Последние восемь лет стали весьма печальными. Созданная экосистема выращивания кристаллов, например, кремния, начиная от производства вспомогательных материалов, оборудования, оснастки и заканчивая выпуском слитков и пластин, распадается до состояния, когда на "одном волоске" едва удерживаются отдельные технологические направления. Подольский ХМЗ обанкротился. Завод "Кристалл" в Таганроге – в стадии банкротства. В России только "УКМ-Синтез" выпускает монокристаллы кремния методом Чохральского для электронной промышленности и лишь "СТВ-Телеком" – полированные подложки. Одна венчурная компания под эгидой "Роснано" предложила опытную партию кварцевых тиглей, провела успешные испытания, но дальнейшие работы прекращены. "УКМ-Синтез" выпускает графитовые узлы для печей выращивания. Нет в России собственного производства поликремния.

В настоящее время в России нет промышленного производства полупроводящего GaAs для СВЧ-применений. В небольшом количестве в АО "Гиредмет" и на зеленоградском предприятии "Элма-Малахит" выпускается легированный GaAs для оптоэлектроники. В ряде вузов есть участки выращивания различных монокристаллов. В Томском государственном университете занимаются GaAs. Но массовое производство отсутствует – потребности удовлетворяются за счет импорта.

Несколько лучше ситуация в области выращивания оксидных кристаллов. В ряде институтов РАН существуют участки выращивания различных монокристаллов. Так, в Институте неорганической химии СО РАН получают кристаллы германата висмута $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO), монокристаллы калий-гадолиниевого вольфрамата (KGW:Nd) и другие монокристаллы. В Москве на предприятии "Фомос" налажено производство ряда оксидных монокристаллов. В зеленоградском НИИМВ выращивают оптические и лазерные монокристаллы гранатовых соединений и монокристаллы A_2B_6 .

В сфере монокристаллов германия есть некоторые успехи. Так, "Германий" – крупнейший во времена СССР производитель германиевых монокристаллов и изде-

лий – сохранил мощности по всей технологической цепочке для переработки до 20 тонн в год. В последние годы перерабатывается 8–15 тонн сырья, что соответствует доле предприятия 10–12% на мировом рынке. Новый производитель изделий из германия – ООО "Германий и приложения" (появился в 2006 году) – имеет собственную сырьевую базу. Существуют также лаборатории исследования германия в Гиредмете и Тверском государственном университете.

Что касается государственной поддержки, то Постановлениями Правительства РФ от 17 февраля 2016 года № 109 и № 110 утверждены правила предоставления субсидий из федерального бюджета российским организациям, реализующим комплексные проекты в рамках Госпрограммы Российской Федерации "Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013–2025 годы". Но предложенные меры поддержки не могут пока улучшить ситуацию в материаловедческих сегментах полупроводниковой, оптической и лазерной отраслей промышленности. Дело в том, что по мере развития электронной компонентной базы для отечественной электроники программы господдержки начинают действовать с момента создания приборной структуры, а обязательное условие финансирования комплексного проекта государством – налаживание серийного выпуска продукции. Поэтому на стадии получения материалов для ЭКБ (слитков и пластин кремния, арсенида галлия, фосфида индия и т.д.) по экономическим причинам приходится "экономить". В последнем случае исходные материалы покупаются за границей. Сегодня существует риск потерять ряд технологий получения и обработки материалов, незначительных по объему производства, но крайне необходимых для полноценного развития отрасли (получение методом Чохральского антимонида индия, селенида-цинка-кадмия, фосфида индия, фосфида галлия и т.д.). Научные школы материаловедения полупроводниковых и оптических материалов живы, инженерные – находятся на грани исчезновения.

Безусловно, государство принимает ряд мер. Разумной представляется идея использования бумажной солнечной энергетики в мире. Не столько для замены традиционной солнечной, сколько для поддержания и выживания российских производителей и разработчиков полупроводниковых материалов и приборов (в первую очередь кремниевых), поскольку в обоих случаях востребованы одни и те же научные школы, схожие производства, оборудование и т.д. Так, Постановлением Правительства РФ от 28 мая 2013 года № 449 предусмотрено ежегодное проведение конкурсов проектов с использованием, в частности, солнечной энергетики на право получения финансирования путем заключения договора о предоставлении мощности в течение 15 лет с момента ввода объекта в эксплуатацию. При этом

гарантированный государством возврат инвестиций составит около 14%. По условиям конкурса установлены требования локализации производства оборудования в России – государство применяет льготы: уровень локализации с 20% в 2013–2014 годах повышается до 65–70% к 2020 году.

23 января 2015 года было принято Постановление Правительства РФ № 47 "О внесении изменений в некоторые акты правительства РФ по вопросам стимулирования использования возобновляемых источников энергии на розничных рынках электрической энергии". В стране заработал розничный рынок электроэнергии и мощности, полученной от возобновляемых источников, – в дополнение к оптовому, который развивается на протяжении двух лет.

Почему не срабатывают предусмотренные меры в сфере выращивания монокристаллов кремния в России? Представляется, что это следствие неправильно установленных законом относительных долей различных технологических операций в общей технологической цепочке получения кремниевого "солнечного" элемента и модуля, что и приводит к объединению капиталоемких и технологически сложных процессов в общую долю локализации. В силу этого потенциальный инвестор вынужден заниматься одновременно двумя инвестиционными проектами, крайне капиталоемкими и наукоемкими по мировым меркам, что практически неосуществимо.

Таким образом, представляются насущно необходимыми следующие действия со стороны государства, профессионального сообщества и институтов развития:

- программы государственной поддержки, направленные на развитие электронной компонентной базы для отечественной электроники, производства оптических изделий и изделий лазерной техники, должны предусматривать стадию получения соответствующих материалов;
- инвесторы ждут сигнала о том, что Постановления Правительства РФ № 449 и № 47 будут продлены после 2020 года. Поддержка солнечной энергетики стимулирует формирование развитой экосистемы производства материалов и элементов электронной техники в жизненно важных для государства областях;
- в требования по локализации производства Si солнечного модуля, установленные Постановлением Правительства РФ № 449, необходимо внести изменения, предусматривающие получение доли локализации за каждую технологическую операцию получения поликремния и выращивания монокристаллов кремния.

В заключение расскажем одну историю. Весной 1958 года в СССР изготовили кремниевую солнечную батарею, которую впервые в мире установили на борту

искусственного спутника Земли ИСЗ-3, выведенного на космическую орбиту 15 мая того же года. Полученные результаты свидетельствовали о длительной работе и надежности устройства. Батарея была создана летом 1957 года из слитков монокристаллического p-кремния с удельным сопротивлением ~1,0 Ом·см. P-база элемента была выбрана потому, что в то время первый поликремний, получаемый на Подольском ХМЗ методом цинкотермического восстановления тетраоксида кремния, имел остаточную примесную проводимость p-типа из-за недостаточной очистки от бора. Однако позже выяснилось, что именно такая структура солнечной батареи более устойчива к космической деградации, чем структура на кремнии n-типа, предложенная американцами, которые в том же году вывели свой спутник с солнечными батареями. Позже стали понятны механизмы деградации полупроводниковых структур под действием ионизирующего излучения. Но тогда никто этого не знал, и, можно сказать, советским конструкторам повезло.

В настоящее время 60-летний лимит везения исчерпан. Пора действовать...

Автор выражает признательность В.Ю.Жвирблянскому, М.П.Черткову, Х.И.Макееву и М.Я.Дашевскому за помощь в подготовке статьи. **Статья посвящена памяти М.Я.Дашевского.**

ЛИТЕРАТУРА

1. **Uecker R.** The historical development of the Czochralski method // Journal of Crystal Growth. 2014 № 401. P. 7–25.
2. **Zulehner W.** Historical Overview of Silicon Crystal Pulling development // <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921510799004274> (дата обращения 17.03.2016).
3. Innovation History // The Sources of Innovation by Eric von Hippel. Oxford University Press. 1988 // <http://web.mit.edu/evhippel/www> (дата обращения 17.03.2016).
4. **Howard R. Huff.** An Electronics Division Retrospective 1952–2002 and Future Opportunities in the Twenty-First Century // Journal of The Electrochemical Society. 2002. № 149. V. 5. P. 35–58.
5. **Hans J. Scheel.** The development of Crystal Growth technology // Crystal Growth Technology. Edited by H. J. Scheel and T. Fukuda. 2003. John Wiley & Sons, Ltd.
6. **Жвирблянский В.Ю.** Методы и оборудование для выращивания монокристаллов. – Брянск, 2012. 119 с.
7. Гиредмет, наша история / Сб. под ред. Ю.Н.Пархоменко. – М., 2007. 243 с.
8. http://www.sumcosi.com/english/products/next_generation/evolution.html (дата обращения 17.03.2016).
9. http://minpromtorg.gov.ru/press-centre/news/#!innovacii_i_proekty_importozameshheniya_v_radioelektronnoy_otrasli_poluchat_gospodderzhku (дата обращения 17.03.2016).