



Рис. 6. Изменение тока автоэмиссии во времени (приведен участок кривой от 1400 до 5000 ч), измеренного для отпаянного вакуумного диода при давлении остаточных газов 10^{-8} торр [9].

осаждения эмитирующих пленок. Рисунки 5а, б соответствуют случаю, когда эмиссионная пленка осаждена только на металлические полоски. На рисунке 5в приведена фотография, полученная в аналогичных условиях, но с селективным осаждением эмиссионной пленки и в пределах металлических полосок.

В заключение этого сообщения необходимо отметить, что созданный нами углеродсодержащий материал является механически и химически стабильным и сохраняет приведенные выше автоэмиссионные характеристики в течение длительного рабочего времени. Так, изменение во времени автоэмиссионных параметров созданных нами автокатодов исследовалось в ряде лабораторий США (Oxford Instruments, Sarnoff Labs и др.) [9]. Было показано, что созданные нами автоэммитеры могут работать свыше 5000 ч без существенного ухудшения эмиссионных характеристик. Это проиллюстрировано на рис. 6, где приведены результаты измерений [9], полученные при плотности эмиссионного тока порядка 1 A cm^{-2} .

Список литературы

1. Spindt C A, Brodie I, Humphrey L J. *Appl. Phys.* **47** 5248 (1976)
2. *Fundamentals of Vacuum Microelectronics* (Ed. Wei Zhu) (New York: Wiley & Sons, 2000)
3. Polushkin V M, Polyakov S N, Rakhimov A T et al. *Diamond Related Mater.* **3** 531 (1994)
4. Rakhimov A T et al., US Patent No. 6042900, 12.03.96
5. Blyablin A A et al., in *Proc. of the XI Intern. Vacuum Microelectronics Conf.* (Esheville, 1998) (Technical Digest (DLC) 99110922) (Piscataway, N.J.: IEEE, 1998) p. 234
6. Rakhimov A T, Seleznev B V, Suetin N V, Timofeev M A, in *Proc. Applied Diamond Conf.* 11 Suppl. (Gaithersburg: NISTIR5692, 1995)
7. Rakhimov A T et al., in *Proc. of the XI Intern. Vacuum Microelectronics Conf.* (Esheville, 1998) (Technical Digest (DLC) 99110922) (Piscataway, N.J.: IEEE, 1998) p. 224
8. Rakhimov A T, Suetin N V, Soldatov E S et al. *J. Vac. Sci. Technol. B* **18** 76 (2000)
9. Busta H H, Espinosa R J, Rakhimov A T et al. *Solid State Electronics* (Special Issue on Vacuum Microelectronics) (2000) (in press)

Создание оборудования нового поколения для роста кристаллов из расплава. Развитие Экспериментального завода научного приборостроения РАН в новых экономических условиях

В.А. Бородин

1. Введение

В настоящей статье рассматриваются результаты по развитию технологий выращивания кристаллов заданной формы и созданию оборудования для выращивания монокристаллов методами Чохральского, Степанова и разработанными нами модификациями метода Степанова. Кроме того, в статье приводятся основные направления развития Экспериментального завода научного приборостроения (ЭЗНП) РАН.

2. Формообразование кристаллов из расплава и аппаратура для их получения

Стандартный способ Степанова позволяет получать профилированные кристаллы с заданной формой поперечного сечения вдоль оси роста. Однако для различных технических применений требуются кристаллы и с более сложными формами, которые можно было бы получать непосредственно из расплава, если разработать технологии изменения формы поперечного сечения выращиваемого кристалла в ходе процесса роста.

Исследования, которые мы проводим с 1982 г., привели к созданию двух основных технологий. Первая из них, получившая название "вариационного формообразования" [1, 2], обеспечивает дискретное изменение формы поперечного сечения вытягиваемого профиля. Вторая технология, названная методом "локального динамического формообразования", позволяет выращивать сложные кристаллические изделия с непрерывно изменяющейся по заданной программе формой боковой поверхности кристалла [3–7]. В наших предыдущих работах [1, 2, 4, 6, 7] были представлены сложные сапфировые изделия, полученные с помощью этих технологий, в том числе изделия полусферической формы, в виде полых конусов и т.д. Выполненные исследования позволили создать новый, не имеющий аналогов тип ростового оборудования "кристаллизационный центр" [4, 6], который обеспечивает:

- выращивание кристаллов постоянного поперечного сечения (традиционный способ Степанова);
- дискретное изменение формы кристаллов в ходе процесса роста (вариационное формообразование);
- непрерывное изменение по заданной программе формы боковой поверхности сплошных и полых тел вращения (локальное динамическое формообразование);
- рост кристаллов с винтовым рельефом на боковой поверхности.

Полученные результаты по выращиванию кристаллов сложных форм методами вариационного и локального динамического формообразования позволяют утверждать, что возможно создание новой перспективной технологии, обеспечивающей трехмерное измене-

ние формы выращиваемого кристалла в ходе процесса роста.

Опыт по выращиванию монокристаллов методами Чохральского, Степанова, вариационного и локального динамического формообразования показали, что повышение качества кристаллов, увеличение производительности производства за счет увеличения выхода годных кристаллов, а также принципиальная возможность реализации новых технологий на установках типа "кристаллизационный центр" невозможны без создания нового ростового оборудования. Аппаратура нового поколения, с одной стороны, должна представлять собой прецизионный инструмент, позволяющий активно проводить исследования по получению различных видов кристаллов и профилей, предоставлять возможность устанавливать влияние различных параметров процесса роста на качество кристаллов, а с другой соответствовать по надежности и эксплуатационным характеристикам промышленному уровню оборудования. Одним из условий соответствия этому двойному требованию является оснащение ростовой установки современным программно-техническим комплексом (ПТК), включающим информационно-вычислительные и управляющие функции.

Информационно-вычислительные функции ПТК созданной нами установки РОСТОКС-01 включают сбор и первичную обработку аналоговых и дискретных сигналов, отображение и регистрацию информации для оперативного персонала, технологическую сигнализацию, регистрацию аварийных ситуаций, регистрацию событий, накопление информации в архиве, протоколирование информации.

К управляющим функциям ПТК относятся автоматическое регулирование, логическое управление, возможность дистанционного управления. Управляющая программа NIKA2000 разработана в среде Microsoft Visual C++ 6.0 для операционных систем Windows-95, Windows-98, Windows NT. Модульное построение программы обеспечивает ее быструю адаптацию к различным методам выращивания кристаллов из расплава и к новым внешним устройствам. В программе разделены следующие модули: модуль представления данных процесса выращивания, модуль ручного управления процессом роста и управления внешними устройствами согласно заданным режимам, модуль математической модели процесса выращивания и автоматического управления по каналу мощности.

Автоматизированная система с обратной связью включает в себя алгоритмы оценивания состояния объекта и управление контурами регулирования температуры нагревателя, скорости вытягивания (каналы управления). Объектом управления является поперечный размер вытягиваемого кристалла, который обычно определяют путем простого вычисления по сигналу датчика, измеряющего суммарную силу, действующую на вытягиваемый кристалл. Вычислительное устройство (или программный блок) вычисляет значение силы, соответствующее поддерживаемому значению радиуса слитка. Главный регулятор регистрирует показания датчика и вычисленное значение силы, определяет величину их рассогласования и вырабатывает сигнал управления мощностью нагревателя на основе своих значений настройки. Величина программного значения силы вычисляется согласно уравнению наблюдения, в кото-

ром фазовые переменные (радиус кристалла и высота мениска) являются постоянными или изменяются в соответствии с ранее определенными функциями.

Известное уравнение наблюдения датчика для метода Чохральского, полученное У. Бардсли [8] из анализа действующих на кристалл сил, имеет следующий вид:

$$W(t) = \int_0^t \rho_S g \pi r^2 V(\tau) d\tau + \pi r^2 \rho_L g h + 2\pi r \sigma_{LG} \cos \varepsilon, \quad (1)$$

где $W(t)$ — моделируемое значение показания датчика силы, ρ_S , ρ_L — плотности кристалла и расплава, r — радиус кристалла, σ_{LG} — коэффициент поверхностного натяжения расплава, ε — угол роста, V — скорость вытягивания кристалла, h — высота мениска. Первое слагаемое соответствует весу кристалла, выращенного за время t , второе — весу мениска высотой h и последнее — действующей на кристалл силе поверхностного натяжения.

Однако для метода Степанова и его вариантов, использующих формообразующие устройства, данное уравнение неприменимо. Наши экспериментальные исследования по влиянию параметров процесса на показания датчика силы при росте профилированных кристаллов [9] и математическое моделирование тепло- и массопереноса в системе кристалл–расплав [10] показали, что отклонение от стационарного процесса роста вызывает изменение гидродинамического давления в мениске расплава, что, соответственно, приводит к изменению силы, действующей на кристалл. В результате для кристаллов, выращиваемых с использованием формообразующих устройств, было получено следующее уравнение наблюдения:

$$W(t) = \int_0^t \rho_S g S(t) V_0 dt + S(t) \rho_L g h + \Gamma(t) \sigma_{LG} \cos \varepsilon + H_{\text{eff}}(t) \rho_L S(t) + K_R V_0 + \int_S p(h, V_0) ds. \quad (2)$$

Здесь $S(t)$, $\Gamma(t)$ — площадь и периметр кристалла, V_0 — скорость вытягивания кристалла, h — высота мениска, K_R — коэффициент сопротивления канала формообразователя течению расплава, $p(h, V_0)$ — гидродинамическое давление под фронтом кристаллизации.

Причиной осцилляций положения фронта кристаллизации являются как флуктуации температуры вблизи него, так и механический шум аппаратуры. Анализ полученного уравнения наблюдения (2) показывает, что уменьшение высоты мениска должно сопровождаться увеличением амплитуды колебания показаний датчика силы. Действительно, при попытках автоматического выращивания профилированных кристаллов с применением классического ПИД-управления было установлено, что переохлаждение расплава, сопровождающееся уменьшением высоты мениска, вызывало рост шума измерения. Численное дифференцирование отклонения показаний датчика от моделируемого значения силы позволило значительно лучше выявить этот эффект. Когда значение амплитуды колебаний ΔW становилось выше некоторого значения, управление теряло устойчивость, и было необходимо вмешательство оператора. Обычно устойчивый режим поддерживался оператором вручную путем резкого повышения мощности нагрева или коррекции программного значения силы.

В работе [11] нами был предложен наиболее простой и эффективный способ автоматического управления, названный "комбинированным". Как следует из вышеизложенного, для обеспечения непрерывного процесса автоматического регулирования с постоянной настройкой регулятора необходимо сохранять неизменными динамические характеристики объекта управления, т.е. в нашем случае поддерживать высоту мениска в определенном диапазоне. Экспериментальные данные и результаты моделирования показали, что параметром косвенной информации о высоте мениска является величина амплитуды $\Delta \dot{W}$. Если величина этого параметра превышает экспериментально установленное критическое значение, то программа блокирует ПИД-регулятор и производит плавное увеличение мощности нагрева до тех пор, пока амплитуда $\Delta \dot{W}$ не окажется в установленных пределах. Снижение $\Delta \dot{W}$ до заданной величины является сигналом для включения ПИД-регулятора, который далее "ведет" процесс роста до того момента, пока $\Delta \dot{W}$ вновь превысит установленное значение. Метод комбинированного управления успешно применяется для группового выращивания 15 сапфировых стержней прямоугольного поперечного сечения и пакета из 10 лент в серийном производстве.

Для получения кристаллов методами Чохральского, Степанова, вариационного и локального формообразования создана и серийно выпускается Экспериментальным заводом научного приборостроения РАН установка РОСТОКС-01. Она позволяет получать кристаллы из конгруэнтно плавящихся веществ с температурами плавления до 2200 °С. В состав установки входят: ростовой модуль, механизмы вращения и перемещения верхнего и нижнего штоков, система вакуумной откачки (5×10^{-5} мм рт. ст.) и контролируемой подачи технологических газов (Ar , N_2 , O_2) программно-технический комплекс, компьютерная система управления и высокочастотный тиристорный преобразователь.

Диаметр цилиндрической ростовой камеры составляет 600 мм, высота — 750 мм. Имеется дополнительная верхняя камера для приемки растущего кристалла. Ход верхнего штока — 600 мм, рабочая скорость вытягивания 0,6–120 мм ч⁻¹. Установочная скорость перемещения верхнего штока — 0,5–150 мм мин⁻¹. Диапазон регулирования скорости вращения верхнего штока — 5–100 об мин⁻¹. Рабочий ход нижнего штока 200 мм. Скорости перемещения и вращения нижнего штока также варьируются в широком диапазоне. Мощность тиристорного преобразователя частоты составляет 50 кВт, частота 8000 Гц. Установка достаточно компактна, составные части установки имеют следующие габариты (ширина × длина × высота, мм): модуль ростовой — 1125 × 1160 × 3500; тиристорный преобразователь частоты — 600 × 600 × 2000; устройство автоматизации и управления — 500 × 500 × 500.

Система автоматизации включает канал управления и контроля мощности тиристорного генератора, канал перемещения и вращения штоков и канал, контролирующий вес растущего кристалла и другие действующие на кристалл в процессе роста силы. В автоматическом режиме контроль и управление мощностью генератора обеспечивает управляющая программа. Для обработки текущей информации, ее архивации и управления процессом используется компьютер промышлен-

ного исполнения, что повышает надежность работы установки.

Установка экспортируется в ряд зарубежных стран. В данный момент на ее базе создаются промышленный образец для проведения процесса локального динамического формообразования и опытный образец установки для осуществления трехмерного управления формой кристалла в ходе выращивания.

3. Основные направления развития ЭЗНП РАН

Сегодня основными направлениями деятельности предприятия являются:

— производство современного телекоммуникационного оборудования;

— разработка и производство современных технических средств для автоматизированных систем управления технологическими процессами, средств промышленной и специальной электроники, а также программно-аппаратных комплексов для промышленных объектов, включая объекты атомной энергетики;

— разработка и производство автоматизированного оборудования для выращивания монокристаллов и аналитических приборов для изучения структуры и химического анализа веществ;

— разработка и производство техники специального назначения.

Освоение серийного производства телекоммуникационного оборудования псевдохронной цифровой иерархии (PDH) и синхронной цифровой иерархии (SDH) начато в 1994 г. За основу было выбрано оборудование, производимое японской компанией NEC. В 1997 г. ЭЗНП приобрел у NEC технологию и лицензию на право самостоятельного производства указанной выше аппаратуры. С апреля 1998 г. предприятие выпускает оборудование передачи SDH и PDH по полному производственному циклу. В 1999 г. освоено производство SDH-оборудования уровня STM-16 со скоростью передачи 2500 Мб с⁻¹. Заказчиками предприятия стали десятки российских операторов связи, крупнейшими из которых являются АО "Ростелеком" и АО "Петербургская телефонная сеть", Министерство путей сообщения, АО "Электросвязь" Московской области.

ЭЗНП РАН (ЭЗАН) является первым отечественным предприятием, освоившим производство аппаратуры синхронной цифровой иерархии. Сервисная поддержка оборудования, производимого и поставляемого на российский рынок ЭЗНП РАН и NEC как в течение гарантийного периода, так и после его окончания осуществляется Сервисным центром, размещенным на предприятии.

Специальным конструкторским бюро ЭЗНП РАН разработаны и серийно выпускаются размерный ряд конструктивов "Евромеханика" в соответствии с требованиями международного стандарта МЭК-297 и ряд аппаратных средств на базе открытых магистрально-модульных стандартов VME и PCI, включающих широкую номенклатуру модулей УСО, программируемых контроллеров со встроенными процессорами промышленного исполнения.

Для решения задач АСУ ТП верхнего и нижнего уровней в приложении к конкретным промышленным объектам применяется разработанный совместно с компанией "ТЕХНОКОМ-микро" программно-аппаратный комплекс ТУРБОКОМ-4011. Этот комплекс предназна-

чен для создания многоуровневых, распределенных систем автоматизации технологических процессов. ЭЗНП РАН получил лицензию Государственного атомного надзора, позволяющую проводить разработку и производство средств автоматизации для объектов атомной энергетики.

В последние годы ЭЗНП РАН для сохранения высоких технологий производства аналитических приборов и получения глубокого вакуума, а также, учитывая перспективу развития рынка, разработал совместно с Институтом аналитического приборостроения РАН и производит хромато-масс-спектрометр МСД-650, который предназначен для качественного и количественного анализа токсичных компонентов смесей органических соединений и их идентификации. Это первый отечественный прибор высокого класса, позволяющий идентифицировать супертоксиканты, в том числе и диоксины. Прибор сертифицирован Госстандартом РФ в Государственном реестре средств измерений, номер сертификата 1297. На базе МСД-650 разрабатываются новые приборы, в частности масс-спектрометры с тлеющим зарядом для анализа неорганических веществ.

Выполнение программы развития высоких технологий, производство и поставка на отечественный и зарубежный рынки наукоемкой продукции позволили превратить завод в рентабельное, конкурентоспособное предприятие.

Список литературы

1. Бородин В А и др. *Изв. АН СССР. Сер. Физ.* **47** 368 (1983)
2. Borodin V A et al. *J. Cryst. Growth* **82** 89 (1987)
3. Бородин В А и др., Авт. свид. SU 1415820 С 30 В 15/34, 05.12.85
4. Бородин В А и др. *Изв. АН СССР. Сер. Физ.* **52** 2009 (1988)
5. Бородин В А, Сидоров В В, Яловец Т Н *Кристаллография* **35** 185 (1990)
6. Borodin V A et al. *J. Cryst. Growth* **104** 69 (1990)
7. Borodin V A et al. *J. Cryst. Growth* **198/199** 201 (1999)
8. Bardsley W et al. *J. Cryst. Growth* **23** 369 (1974)
9. Borodin A V, Borodin V A, Sidorov V V, Petkov I S *J. Cryst. Growth* **198/199** 215 (1999)
10. Borodin A V, Borodin V A, Zhdanov A V *J. Cryst. Growth* **198/199** 220 (1999)
11. Borodin A V, Borodin V A, Petkov I S, Sidorov V V *J. Korean Assoc. Cryst. Growth* **4** 437 (1999)

PACS numbers: 06.60.Jn, 06.90.+v, 07.68.+m, 78.20.Jq

Фемтосекундная фотоэлектроника (прошлое, настоящее, будущее)

М.Я. Щелев

1. Введение

Среди диагностических методов и средств, используемых в экспериментальной физике для изучения быстропротекающих процессов (БПП), высокоскоростная электронно-оптическая фотография выделяется своим рекордным быстродействием (теоретический предел временного разрешения $10 \text{ фс} = 10^{-14} \text{ с}$), большим объемом одновременно регистрируемой пространственной информации (до $10^6 - 10^8$ разрешаемых элементов), предельной чувствительностью (регистрируется каждый электрон, эмиттируемый входным фотокатодом), широ-

ким спектральным диапазоном регистрации (от мягкого рентгеновского до ближнего ИК излучения), возможностью быстрого (доли секунды) ввода зарегистрированных изображений БПП в компьютер для их последующего хранения, обработки, визуализации и анализа. Ключевым устройством любой электронно-оптической камеры (ЭОК), осуществляющей временную фиксацию последовательных фаз изображений БПП, является времяанализирующий электронно-оптический преобразователь (ЭОП). Его принцип действия заключается в линейном (по интенсивности) преобразовании в пленке фотокатода толщиной 100–300 Å оптического изображения БПП в фотоэлектронный аналог, фокусировании этого фотоэлектронного изображения на выходной экран (слой люминофора, мишень видикона, ПЗС-матрица) и "раскладывании" либо всего фотоэлектронного изображения, либо его части, ограниченной, например, узкой щелью, по выходному экрану. При этом фазовая скорость перемещения изображения по экрану может в несколько раз превышать скорость света, что достигается за счет практически безынерционного отклонения электронного пучка быстроменяющимся электрическим полем. В итоге, каждый пространственный элемент фотоэлектронного изображения δ , разложенный вдоль направления развертки, соответствует определенному временному интервалу, причем минимально регистрируемый временной интервал равен $\Delta t = \delta/V$, где V — линейная скорость развертки. Для используемых на практике ЭОК, работающих в режиме линейной развертки (стрик-камер), минимальный размер разрешаемого пространственного элемента (в статическом режиме, т.е. без развертки) может приближаться к $(1-2) \times 10^{-3} \text{ см}$, а фазовая скорость развертки может превышать $10^{11} \text{ см с}^{-1}$. Это означает, что в принципе точность временных отсчетов может достигать 10^{-14} с . Надо, конечно, учитывать квантово-механический характер взаимодействия электронов с отклоняющим полем, что может привести к "дробовому эффекту" отклонения и, как следствие, к неупорядоченным флуктуациям скорости развертки. Оценки показывают, что эти флуктуации не превышают 10^{-15} с .

Когда в начале 30-х годов были изобретены первые электронно-оптические преобразователи [1], никто и не думал использовать их для высокоскоростной фотографии. Имелось в виду, что с помощью этих приборов в ночное время, при подсветке невидимым глазу ИК излучением, можно будет рассматривать интересующие объекты. Первые ЭОП содержали фотокатод и люминесцентный экран, расположенные параллельно друг другу, и между ними прикладывалось ускоряющее напряжение. В однородном электрическом поле фотоэлектроны разлетались по параболам, давая на экране размытое изображение объекта. В начале 40-х годов в работах Л.А. Арцимовича [2] в нашей стране, а также в исследованиях ученых Германии и США [3–6] пространственное разрешение ЭОП было повышено до нескольких десятков пар линий на миллиметр за счет фокусирования изображения в ЭОП электростатическими и магнитными линзами.

К концу 40-х – началу 50-х гг. относятся первые попытки импульсного включения ЭОП ночного видения с последующим их использованием для изучения временных характеристик импульсных источников света. М.П. Ванюков с сотрудниками [7] на немецких ЭОП