

С. С. Ерошин (г. Луганск)

### **Расширение технологических возможностей машин и приборов с кольцевыми рабочими органами**

*Показана возможность создания технологических машин и приборов с рабочим органом в форме широкого плоского кольца, которое не имеет механических опор и электрических контактов, приводится во вращательное движение, удерживается в пространстве и воспринимает технологические нагрузки за счет сил магнитного поля индукторов. Теоретически получен и экспериментально подтвержден критерий устойчивого вращения свободного кольцевого ротора. На примере станка алмазной резки и центробежного насоса показаны технологические и экономические преимущества новых конструкций. На сайте <http://www.elmache.com/> демонстрируется алмазная резка свободным отрезным кругом напроход, вращение рабочего колеса центробежного насоса, который не имеет ни вала, ни подшипников, и компьютерные модели станков резки полупроводниковых монокристаллов.*

**Ключевые слова:** свободный ротор, устойчивость движения, алмазная резка, центробежный насос.

Идея создания технологических машин со свободно вращающимся в пространстве инструментом или рабочим органом появилась в результате работ по разрезке слитков полупроводниковых и других функциональных материалов на тонкие пластины — подложки для микроэлектронных приборов. Многие годы этот процесс осуществляли с помощью алмазных отрезных кругов с внутренней режущей кромкой (АКВР). Главным ограничением дальнейшего их применения является тот факт, что в современной технологии микроэлектроники и гелиоэнергетики существует устойчивая тенденция увеличения размера подложек. В настоящее время диаметры монокристаллов кремния достигают 300 мм. Алмазный инструмент должен быть примерно в четыре раза больше, чем диаметр разрезаемого монокристалла. Например, в станке модели T-SM-300 CNC отрезной круг имеет диаметр 1180 мм при массе станка до 5 т и установленной мощности до 10 кВт. Таким образом, разрезка крупногабаритных монокристаллов кругами АКВР представляет собой экстенсивный путь развития технологии, который приводит к увеличению массогабаритных и энергетических параметров специального технологического оборудования.

В современных машинах и приборах широко используют рабочие органы и инструмент в форме плоского широкого кольца, совершающего движение вокруг оси симметрии. Традиционно кольцевой рабочий орган (КРО) фиксируют в пространстве, приводят во вращательное движение и он воспринимает нагрузки посредством валов или шпинделей. Автором сделана попытка создания таких машин, кольцевые рабочие органы которых не имели бы механических опор и электрических контактов, т. е. оставались бы свободными в пространстве. Это может быть достигнуто, если КРО будет вторичным эле-

ментом специальной электрической машины, за счет сил магнитного поля которой он приводится в движение, удерживается в пространстве и воспринимает различные нагрузки.

Наш подход является дальнейшим развитием известного принципа повышения технического уровня машин и приборов путем применения прямого привода и бесконтактных опор. Известно, что прямой привод частично исключает промежуточные передачи, но оставляет в конструкции шпиндель или вал. Бесконтактные опоры позволяют увеличить рабочую частоту вращения и долговечность машин, снизить потери на трение, однако при этом не уменьшается число вращающихся деталей и их масса, на том же уровне остается энергопотребление, но массогабаритные параметры и себестоимость машин повышаются.

Сокращение количества вращающихся деталей, повышение надежности при снижении себестоимости машины, уменьшение ее массы и энергопотребления могут быть достигнуты путем бесконтактной передачи крутящего момента и стабилизирующих сил непосредственно на рабочий орган. В этом случае исключены механические опоры в виде узлов подшипников, приводной вал, муфты и некоторые другие детали.

Основная идея при создании таких машин — обеспечение устойчивого движения кольцевого рабочего органа без механических опор, что предусматривает создание такого поля сил, за счет которого гарантировано нормальное функционирование машины. Стабилизация пространственного положения кольцевого ротора заключается в том, что вращающийся ротор при действии на него внешних сил, создающих смещение его центра масс, должен оказывать сопротивление этому смещению, а при снятии внешней силы — возвращаться в положение равновесия.

В [1] проведен анализ сил и моментов, действующих на кольцевую пластинку, находящуюся во вращающемся магнитном поле. Пусть кольцевая пластина, выполняющая функции КРО, изготовлена из токопроводящего материала. Магнитное поле создается индуктором с многофазной обмоткой. Результатом взаимодействия переменного магнитного поля индуктора с ротором являются электродинамические силы, которые вызывают его движение. В общем случае эти силы приводятся к главному вектору и главному моменту.

Если оси вращения поля и ротора совпадают, то будет иметь место только главный момент  $M_{0\tau}$ , который вызывает вращательное движение ротора. Главный момент, в электрических машинах его называют вращающим, пропорционален площади кольца и квадрату магнитной индукции  $B$ :

$$M_{0\tau} = \frac{\pi}{2} C_r B^2 (R_{p,n}^4 - R_{p,v}^4). \quad (1)$$

Здесь и в дальнейшем приняты следующие обозначения:  $R_{p,n}$  и  $R_{p,v}$  — наружный и внутренний радиусы кольцевой пластины (ротора);  $C_r$  и  $C_\tau$  — радиальная и тангенциальная составляющие коэффициента скорости.

Так как ротор свободный, то под действием момента  $M_{0\tau}$  он будет совершать вращение вокруг главной центральной оси инерции и разгоняться до такой скорости, при которой момент  $M_{0\tau}$  уравновесится суммой моментов сил сопротивлений и технологических нагрузок. Однако в общем случае это движение является неустойчивым. Малейшего возмущения достаточно для выброса ротора за пределы поля.

Возмущение или малое смещение ротора относительно оси вращения может быть вызвано случайными или технологическими факторами. При этом возникает главный вектор, который в общем случае может иметь радиальную и тангенциальную составляющие  $\mathbf{F}_r$  и  $\mathbf{F}_\tau$ . Радиальная составляющая  $\mathbf{F}_r$  направлена вдоль смещения ротора либо к его центру, либо от центра. Если  $\mathbf{F}_r$  направлена к центру, она противодействует смещению ротора, создает реакцию последнего, тем самым вызывает стабилизирующее воздействие. Тангенциальная составляющая  $\mathbf{F}_\tau$  направлена всегда перпендикулярно смещению и не может быть уравновешена за счет него.

Если по какой-либо причине произойдет смещение центра вращения ротора от центра вращения поля, например, вдоль оси  $OX$  на величину  $e_x$ , главный момент изменит свою величину:

$$M_{0\tau} = \frac{\pi}{2} C_\tau B^2 (R_{p.n}^4 - R_{p.b}^4) + \pi C_\tau B^2 (R_{p.n}^2 - R_{p.b}^2) e_x^2. \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что первое слагаемое полностью соответствует выражению (1), второе — пропорционально квадрату смещения  $e_x$ . Радиальная и тангенциальная составляющие главного вектора соответственно равны

$$F_{rx} = C_r B^2 e_x \pi (R_{p.n}^2 - R_{p.b}^2); \quad (3)$$

$$F_{\tau y} = C_\tau B^2 e_x \pi (R_{p.n}^2 - R_{p.b}^2). \quad (4)$$

Необходимым условием устойчивого вращения ротора является равенство нулю тангенциальной составляющей  $\mathbf{F}_\tau$  и неравенство нулю его радиальной составляющей  $\mathbf{F}_r$  при условии, что  $\mathbf{F}_r$  направлена в сторону противоположную смещению. Именно в этом случае имеет место устойчивое движение.

Дальнейшие исследования показали, что область устойчивого вращения может быть существенно расширена, если на ротор действуют силы сопротивления. Будем считать, что силы внешнего сопротивления пропорциональны первой степени скорости. Такие силы сопротивления характерны для движения тел в жидкой или газообразной средах [2, 3]. Величину сил сопротивления выразим через коэффициент вязкости  $V$ . На КРО будет действовать следующая система сил:

$$F_{rx} = -D_r x_0 \text{ и } F_{\tau x} = -D_\tau y_0, \quad F_{cx} = -Vx' \text{ (вдоль оси } OX);$$

$$F_{\tau y} = D_\tau x_0 \text{ и } F_{ry} = -D_r y_0, \quad F_{cy} = -Vy' \text{ (вдоль оси } OY).$$

В этом случае движение центра масс ротора описывается следующей системой уравнений [4]:

$$\begin{cases} x'' + vx' = -ax - by; \\ y'' + vy' = bx - ay, \end{cases} \quad (5)$$

где  $a = D_r/m$ ,  $b = D_\tau/m$ , а  $D_r$  и  $D_\tau$  — определяют жесткость бесконтактной опоры ротора соответственно в радиальном и тангенциальном направлениях;  $v = V/m$  — кинематический коэффициент сопротивления движению;  $m$  — масса ротора.

На основании теории устойчивости движения Ляпунова [5] по методу Гурвица [6] был получен критерий, выполнение которого обеспечивает асим-

потоковую устойчивость вращения кольцевого ротора без механических опор:

$$v \frac{\sqrt{a}}{b} > 1 \text{ или } \frac{V\sqrt{D_r}}{D_\tau\sqrt{m}} > 1. \quad (6)$$

Движение устойчиво тогда, когда критерий больше единицы. Выражение (6) показывает, что устойчивость движения увеличивается при росте сопротивления среды  $V$  и жесткости бесконтактной опоры в радиальном направлении  $D_r$ , а также при уменьшении жесткости в тангенциальном направлении  $D_\tau$  и массы  $m$ . Чем больше левая часть неравенства (6), тем больше запас устойчивости.

Параметры  $D_r$  и  $D_\tau$  выбирают из конструктивных соображений. По определению жесткость упругой системы есть отношение силы к перемещению (деформации) под действием этой силы. Так как в исследуемой системе аргументом является перемещение центра ротора, вызывающее его реакцию, то понятие жесткости сохраняется. Тогда жесткости ротора в радиальном и тангенциальном направлениях будут соответственно равны:  $D_r = F_r/\delta$  и  $D_\tau = F_\tau/\delta$ . При  $F_\tau = 0$ , соответственно и  $D_\tau = 0$ , движение становится абсолютно устойчивым. Но даже при  $D_\tau \neq 0$  устойчивость движения может сохраняться. Например, если сопротивление среды оказывает большое влияние. Эксперименты показали, что вращение ротора в жидкости существенно повышает устойчивость [7].

Принципиальным является схема приложения нагрузки. Установлено, что воздействие на ротор сосредоточенной силой по внешнему контуру приводит к тому, что ротор может вылететь из поля. Приложение нагрузки к внутреннему контуру повышает устойчивость движения. И как было отмечено выше, равномерно распределенная нагрузка по поверхности ротора стабилизирует движение.

Именно эти свойства были использованы нами при практической реализации идеи. Покажем несколько конкретных вариантов применения рабочих органов без механических опор. В каждом случае достигается одна или несколько целей:

- выполнение уникальной работы;
- расширение технологических возможностей машины;
- повышение технико-экономических показателей машины.

Принцип передачи кинетической энергии кольцевому рабочему органу без механической связи и обеспечения устойчивого вращения без механических опор позволяет осуществлять управляемое плоско-параллельное движение рабочего органа в объеме, отделенном от электромагнитного индуктора герметичной диэлектрической перегородкой.

На рис. 1 показана пластмассовая кювета с водой, на дне которой расположено рабочее колесо центробежного насоса. Кювета установлена на индуктор, который приводит колесо во вращение. Колесо устойчиво вращается и “гонит” воду. При перемещении кюветы относительно индуктора колесо всегда остается над индуктором. Видеофрагмент работы устройства можно видеть на сайте <http://www.elmache.com/>.

Если кольцо ротора оснастить абразивным или каким-либо другим режущим инструментом, то можно проводить механическую обработку внутренней поверхности герметичной емкости, управляя перемещением инструмента снаружи.

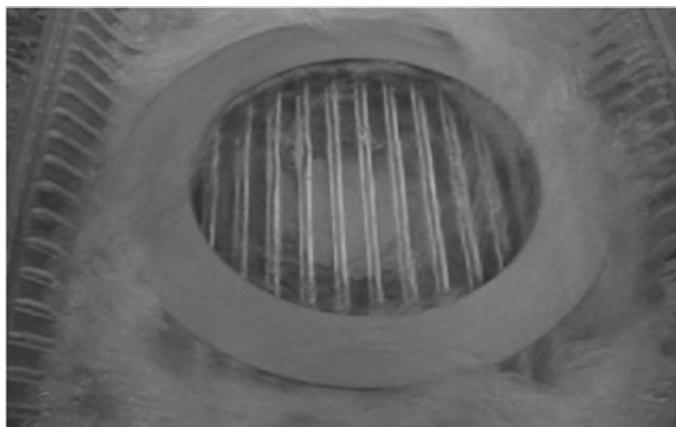


Рис. 1. Вращение рабочего колеса центробежного насоса в кювете с водой (фото).

На этом же принципе могут быть построены всевозможные мешалки и импеллеры, предназначенные для перемешивания химически активных, ядовитых, криогенных или других жидкостей, требующих высокого уровня герметичности при производстве работ. Другим направлением эффективного применения рабочих органов без механических опор являются центробежные и другие динамические насосы. Предлагаемый принцип обеспечивает следующие преимущества:

— исключение из конструкции вспомогательных деталей (вала, муфты, подшипников, уплотнений и пр.) повышает технико-экономические показатели насоса;

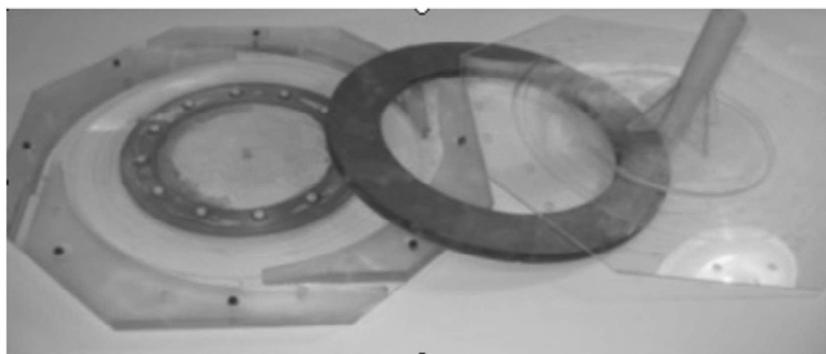
— моноблочность и высокая герметичность корпуса позволяют использовать насос в качестве погружного или для перекачки химически активных, ядовитых, криогенных и других подобных жидкостей.

Для проверки принципа и работоспособности такого насоса нами изготовлен тест-макет (рис. 2).

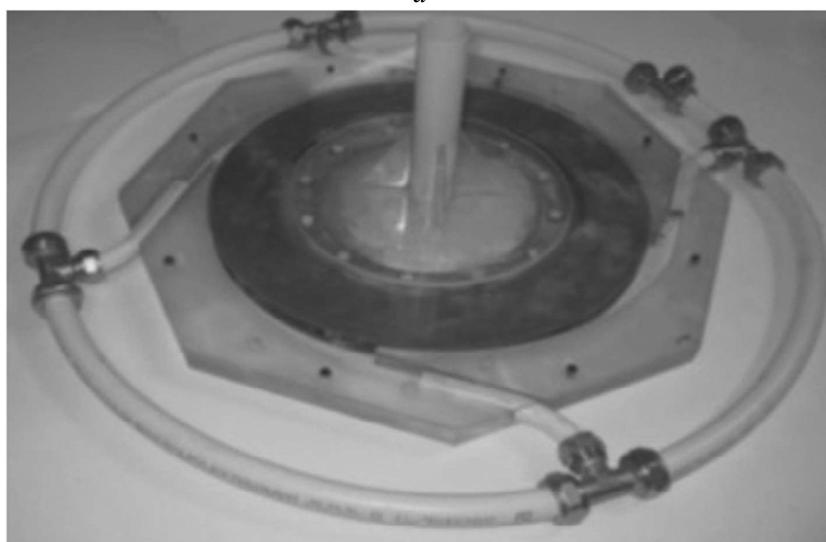
Третьим направлением применения рабочих органов без механических опор могут быть обрабатывающие станки, в которых применяется кольцевой инструмент [8—10]. В частности, если в качестве кольцевого ротора использовать АКВР, то устраняются ограничения на величину диаметра разрезаемого монокристалла. Безусловным остается то, что внутренний диаметр ротора-инструмента должен быть больше диаметра слитка. За счет сил инерции кольцевая пластина приобретает жесткость. Ширина кольца может быть существенно меньше диаметра слитка. Это дает возможность реализовать резку на проход. Схема резания показана на рис. 3. Ее суть заключается в том, что АКВР является свободным ротором. Он приводится во вращение и удерживается в пространстве магнитным полем индуктора, за счет чего свободно внедряется в монокристалл любого диаметра. При этом исключаются из конструкции шпиндельный узел, барабан механизма натяжения и пр. Размер инструмента перестал быть ограничивающим фактором резки крупногабаритных слитков кремния.

Нами изготовлен действующий макет станка резки, который прошел лабораторные испытания. На сайте <http://www.elmache.com/> демонстрируется видеофрагмент, показывающий процесс резки слитка кремния диаметром 60 мм. Инструмент имеет размеры 313 мм по наружному диаметру и 235 мм

по внутреннему. То есть при ширине отрезного круга 39 мм кристалл диаметром 60 мм свободно перерезается.



*a*



*б*

Рис. 2. Насос в разобранном состоянии (*a*) и в сборе (*б*).

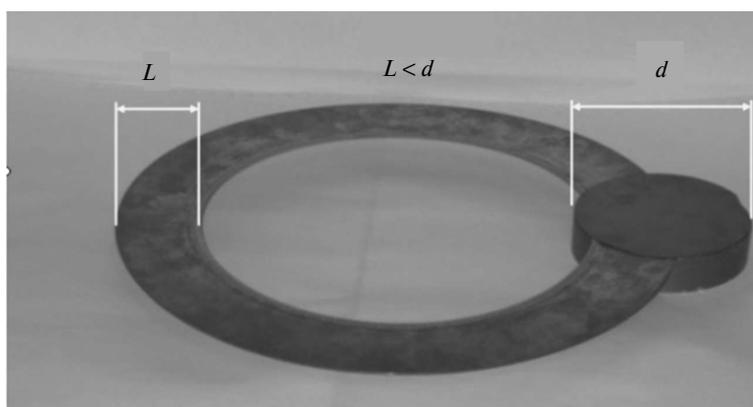


Рис. 3. Схема резки слитка кремния напроход инструментом без механических опор:  $L$  — ширина алмазного отрезного круга,  $d$  — диаметр разрезаемого слитка.

Компьютерная модель станка резки показана на рис. 4. На столе станка размещен узел резания, состоящий из нижнего индуктора, верхнего магнитопровода и ротора-инструмента. Последний представляет собой АКВР, который приводится во вращение и удерживается в пространстве электромагнитной системой. Разрезаемый монокристалл укреплен на кронштейне, совершающем поперечную подачу посредством специального механизма. Отрезанная пластина попадает на транспортер касетировщика. По окончании резки монокристалл возвращается в исходное положение, получает движение осевой подачи и процесс резания возобновляется (см. сайт <http://www.elmache.com/>).

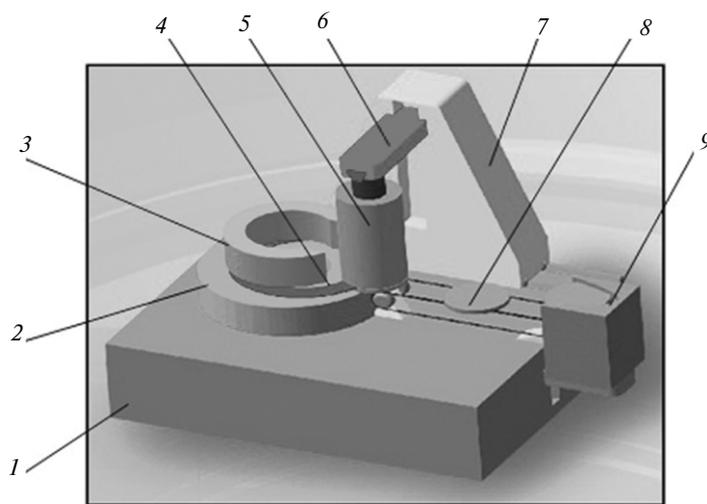


Рис. 4. Компьютерная модель станка резки слитка кремния на пластины алмазным отрезным кругом с внутренней режущей кромкой напроход: 1 — стол; 2 — нижний индуктор; 3 — верхний магнитопровод; 4 — ротор-инструмент; 5 — разрезаемый монокристалл; 6 — кронштейн механизма продольной подачи; 7 — механизм поперечной подачи; 8 — отрезанная пластина; 9 — касетировщик.

Актуальным является применение резки напроход слитков кремния на мерные заготовки, которые в дальнейшем технологическом процессе будут разделяться на пластины, подложки. В отечественном производстве для этой цели чаще всего применяют алмазные отрезные круги с внешней режущей кромкой (АОК). Известно, что АОК не могут конкурировать с АКВР ни по ширине, ни по точности реза. Однако с их помощью можно произвести рез в любом месте длинного слитка кремния, что нельзя сделать АКВР. Реже у нас, чаще за рубежом, для раскроя слитков применяют станки резки бесконечной лентой. Они обеспечивают ширину реза меньшую, чем АОК, но большую чем АКВР. Точность разрезки при этом не удовлетворительна.

В настоящее время у производителей солнечных батарей популярностью пользуются станки для проволочной резки фирмы НСТ (Швейцария). Между тем, реализовать все преимущества проволочной резки в случае раскроя слитков не представляется возможным. Высокая производительность здесь достигается совмещением во времени большого числа резов. Это требует одновременной установки на станке большого числа слитков кремния. В свою очередь, площадь станка, его габариты растут пропорционально числу обрабатываемых слитков, соответственно, растут цена станка и затраты на

его эксплуатацию. Другим недостатком этих станков является сложность и трудоемкость обслуживания.

Предлагаемая схема резания напроход может быть с успехом реализована для раскроя слитков кремния. Не представляет труда создать индуктор подковообразной формы, обеспечивающий устойчивое вращение кольцевого инструмента. При этом в зоне резания инструмент будет оставаться свободным с обеих сторон и длина отрезаемой части слитка кремния ничем не ограничивается. В этом случае можно производить резку тонкой, тестовой пластины и размерных кусков произвольной длины (см. демонстрацию анимационной модели такого станка на сайте <http://www.elmache.com/>).

Наши работы показали, что принцип совмещения функций вторичного элемента электрической машины и рабочего органа технологической машины может с успехом применяться. При прочих равных условиях реализация данного принципа значительно сокращает как материальные, так и энергетические затраты — у нового станка для резки на проход размеры инструмента уменьшаются в 2—3 раза, масса вращающихся частей — в сотни раз, масса станка — в десятки раз, энергопотребление — в 5—10 раз. Простота и технологичность конструкции гарантируют низкую себестоимость изготовления таких станков.

1. *Ерошин С. С.* Определение сил, действующих на кольцевую пластинку, находящуюся во вращающемся магнитном поле // *Зб. наук. пр. Східноукр. держ. ун-ту. Серія: Машинобудування.* — Луганськ: Вид-во СУДУ, 1998. — С. 13—21.
2. *Справочник машиностроителя: В 6 т. / Под ред. Н. С. Ачеркана.* — М.: Машгиз, 1956. — Т. 3: Расчеты на прочность и устойчивость деталей машин. — 564 с.
3. *Справочник машиностроителя: в 6 т. / Под ред. Н. С. Ачеркана.* — М.: Машгиз, 1956. — Т. 1: Математика, теоретическая механика, теория машин и механизмов. — 568 с.
4. *Ерошин С. С.* Концепція створення машин і приладів з прямим приводом робочих органів без механічних опор // *Машинознавство.* — 2007. — № 2 (116). — С. 27—32.
5. *Ляпунов А. М.* Общая задача об устойчивости движения. — М.-Л.: Гостехтеоретиздат, 1950. — 472 с.
6. *Алфутов Н. А., Колесников К. С.* Устойчивость движения и равновесия: Учеб. пособие. — М.: МГТУ, 2003. — 256 с.
7. *Ерошин С. С., Невзлин Б. И., Брешев В. Е.* Экспериментальное исследование реакций свободного кольцевого ротора на радиальную нагрузку // *Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації.* — 2005. — № 1 (10). — С. 23—25.
8. *А. с. 1435082 СССР, МПК Н 01 L 21/461.* Устройство для резки монокристаллов на пластины / С. С. Ерошин, Б. Н. Невзлин, В. П. Сорока. — Оpubл. 11.02.88, Бюл. № 40.
9. *Пат. 76825 Україна, МПК Н 01 L 21/461 В 28 D 5/00.* Пристрій для різання монокристалів на пластини / О. Л. Голубенко, С. С. Ерошин, Б. І. Невзлін, В. Є. Брешев. — Оpubл. 15.09.06, Бюл. № 9.
10. *Пат 77529 Україна, С2 МПК Н01L 21/461.* Пристрій для різання монокристалів на пластини / О. Л. Голубенко, С. С. Ерошин, Б. І. Невзлін, В. Є. Брешев. — Оpubл. 15.12.06, Бюл. № 12.

Восточноукраинский национальный ун-т  
им. В. Даля

Поступила 06.03.08