

УДК.624.315.21:621.3.049.77.002.72

И.Ш. Невлюдов, д-р техн. наук,
М.А. Проценко,
И.С. Хатнюк,
Р.Ю. Аллахверанов

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГИБРИДНЫХ МИКРОСБОРОК

В настоящее время в ряде отраслей (авиакосмическом приборостроении, телекоммуникационной отрасли, робототехнике) все шире используются сверхбыстродействующие многоканальные бескорпусные микросхемы с шагом контактных площадок 50 мкм и менее, что открывает возможность создания устройств с повышенной функциональной емкостью. Как правило, к таким устройствам предъявляются очень жесткие требования по массогабаритным характеристикам, объему и возможности компоновки изделия в трех плоскостях в виде многослойных блоков и пакетов [1–11]. Проблема соответствия таким высоким требованиям была решена за счет новых конструктивно-технологических решений на основе технологии “кристалл на гибкой плате”, или “chip on flex” (COF) [8].

1 Основные современные принципы и технологические методы изготовления гибридных микросборок

Попытка совместить преимущества гибридных технологий с дешевизной традиционного поверхностного монтажа (Surface Mount Tehnology – SMT) привела к созданию в середине 1980-х годов технологии “кристалл на плате”, или “chip on board” (COB-технология). Процесс сборки изделий по COB-технологии подобен процессу сборки гибридных микросхем. В COB-технологии в качестве основы используется печатная плата, а бескорпусные полупроводниковые кристаллы герметизируются заливкой (glob-top), в результате исключается корпусирование.

В настоящее время в некоторых областях приборостроения COB-технология уже фактически вытеснила поверхностный монтаж. Быстрое развитие COB-технологии обусловлено минимизацией массогабаритных характеристик конечного изделия и максимизацией плотности размещения компонентов. Занимаемая кристаллом площадь уменьшается в десятки раз только из-за отсутствия корпуса. Дополнительным преимуществом COB-технологии является тот факт, что сварные соединения, являющиеся основой сборочной технологии “кристалл на плате”, более надежны при воздействии вибрационных и

термоциклических нагрузок, чем паяные соединения, применяемые в технологии поверхностного монтажа.

В середине 1980-х годов была разработана еще одна технология монтажа, которая является комбинацией традиционной технологии поверхностного монтажа (SMT) и COB-технологии. Указанная технология получила название ТАВ-технологии (Tape Automated Bonding) и предназначалась для автоматизированного монтажа с помощью ленточных носителей микросхем с большим количеством выводов. В этом случае выводы микросхем привариваются к медным контактным площадкам рамок с выводами, предварительно изготовленных на медной ленте с изолирующим покрытием. Эти выводы затем припаиваются к металлическим проводникам на печатной плате. На ТАВ-носителях широко применяется монтаж специализированных ИС и многокристальных модулей. Сложность ТАВ-технологии заключается в необходимости применения специализированного автоматизированного оборудования и в проблемах пайки выводов, расположенных с малым шагом [2, 3].

В современном приборостроении широко используются сверхбыстродействующие многоканальные бескорпусные микросхемы с шагом контактных площадок менее 50 мкм, что позволяет создавать устройства с повышенной функциональной емкостью. К таким устройствам предъявляются очень жесткие требования по массогабаритным характеристикам, объему и возможности компоновки изделия в трех плоскостях в виде многослойных блоков и пакетов [4–7]. Ни COB-технология, ни ТАВ-технология уже не удовлетворяют таким высоким требованиям. Проблема была решена за счет новых конструктивно-технологических решений на основе технологии “кристалл на гибкой плате”, или “chip on flex” (COF) [8].

2 Анализ особенностей применения COF-технологии изготовления гибридных микросборок

На начальном этапе COF-технология представляла собой ту же самую COB-технология за исключением того, что коммутирующие элементы изготавливались из гибких материалов. Сборка электронных устройств на гибких коммутирующих элементах осуществлялась на тех же автоматических линиях, которые используются в COB-технологии и с помощью тех же самых методов монтажа кристаллов, пассивных компонентов и формирования электрических соединений.

Гибкие кабели и платы изготавливались на основе различных фольгированных диэлектрических материалов, таких, как майлар, лавсан, полиэтилен, полипропилен, полиэстер, полиимид и др., в зависимости от предъявляемых к аппаратуре требований. Гибкие коммутирующие элементы из фольгированных диэлектриков на основе

лавсана, полиэтилена и т. д. менее дорогостоящие, но возможности монтажа компонентов на них ограничены. В этом случае монтаж компонентов осуществляется с помощью низкотемпературной пайки или с применением электропроводящих адгезивов. К сожалению, при обработке таких диэлектрических материалов не удалось в полной мере применить методы микроэлектронной технологии, основанной на принципе интегральной обработки материалов, и полностью исключить из технологического процесса изготовления гибких плат и кабелей механические операции формирования сквозных отверстий [9]. Кроме того, хотя материалы типа полиэтилена и полипропилена характеризуются достаточно низкими диэлектрическими постоянными и, соответственно, обеспечивают хорошие емкостные характеристики коммутирующих элементов на их основе, они не являются радиационностойкими и не могут обеспечить высокую надежность и срок эксплуатации электронных изделий с жесткими требованиями к радиационной стойкости.

Только фольгированные полиимиды оказались практически незаменимыми для создания функционально сложных электронных изделий с высокими требованиями к радиационной стойкости, термостойкости, быстродействию и долговременной надежности. Стабильность электрических и размерных характеристик полиимидной основы обуславливает высокую технологичность данного материала. Температурная стабильность и высокая термостойкость полиимидных гибких плат позволяет применять высокотемпературные (вплоть до 300°C) методы монтажа компонентов.

Важным фактором, способствующим развитию COF-технологии, послужило появление на мировом рынке серии фольгированных медью полиимидов “Pyralux” на основе полиимидных пленок типа Kapton, разработанных компанией DuPont Electronic Technologies, которая является ведущим поставщиком электронных материалов в мире. В фольгированных диэлектриках “Pyralux LF” и “Pyralux FR” полиимидные пленки соединяются с отожженной медной фольгой с помощью акриловых адгезивов, что позволяет изготовить целый ряд одно- и двусторонних фольгированных диэлектриков с широким диапазоном толщин медных, адгезивных и полиимидных слоев [16-23]. Благодаря применению таких материалов в изделиях электронной техники появилась возможность создания трехмерных конструкций в виде двухслойных или многослойных структур малой толщины и площади, существенно снизить их вес и объем, а также повысить их функциональную емкость, быстродействие и надежность.

Однако применение адгезивсодержащих фольгированных медью полиимидных пленок не позволило в полной мере реализовать преимущества COF-технологии при сборке микромодулей.

К недостаткам адгезивсодержащих фольгированных полиимидов можно отнести достаточно малый диапазон рабочих температур ($-60^{\circ}\dots 125^{\circ}\text{C}$) [12–14]. Применение адгезивов в фольгированных полиимидах существенно усложняет процесс формирования сквозных отверстий в системе “металл – адгезив - полиимид” для межслойных соединений из-за необходимости использования сложных и трудноуправляемых процессов вскрытия “окон” в адгезивных слоях.

Эти недостатки были в значительной степени устранены после появления гибких одно- и двусторонних безадгезивных фольгированных диэлектриков DuPont Pyralux с медной основой [16]. Технологическое преимущество таких материалов состоит в том, что они не содержат адгезивных прослоек между медью и полиимидом, но обладают высокой силой сцепления между слоем меди и поверхностью полиимида. Материалы с безадгезивной и высокопрочной структурой DuPont Pyralux AP и DuPont Pyralux AC являются высокотехнологичными при фотолитографической обработке, групповом избирательном травлении сквозных отверстий в переходах и формировании элементов топологии очень малых размеров. Наиболее важными характеристиками этих материалов являются высокая избирательность при химобработке полиимида и меди; эластичность и механическая прочность полиимида; высокая термостойкость ($+350^{\circ}\text{C}$) и холодостойкость (-196°C) [16].

Ввиду хорошей адаптивности к фотохимическому избирательному травлению полиимида безадгезивная структура материала позволяет полностью исключить из техпроцессов изготовления гибких коммутирующих элементов применение механических операций сверления и фрезерования, заменяя их групповыми процессами, и, таким образом, сократить технологический цикл, снизить трудоемкость и, в конечном счете, уменьшить стоимость изготовления изделий. Кроме того, для микросхем с высокой плотностью и прецизионностью элементов топологии при использовании указанных материалов оказалось целесообразным применение методов микроэлектронной технологии, которая включает в себя использование жидких фоторезистов, обладающих высокой чувствительностью и разрешающей способностью; использование практически всех способов нанесения жидких фоторезистов (центрифугирование, погружение, пульверизация); сочетание позитивных и негативных фоторезистов; применение стеклянных и гибких пленочных фотошаблонов; применение установок с односторонним и двусторонним экспонированием; применение плазмохимической и ионноплазменной избирательной обработки материалов [9].

Описанные выше достоинства безадгезивных медь-полиимидных пленочных материалов были использованы при создании коммутирующих элементов для детекторных микростриповых модулей в международном эксперименте STAR в BNL (США) [18]. Возможность

формирования сквозных отверстий в слоях полиимида позволила отказаться от применения алюминиевой проволоки для соединения контактных площадок микросхем и сенсоров с выводами коммутирующих медь-полиимидных плат и кабелей и осуществлять присоединение выводов непосредственно к контактным площадкам микросхем и сенсоров с помощью ультразвуковой сварки через “окна” в полиимиде (рис. 1).

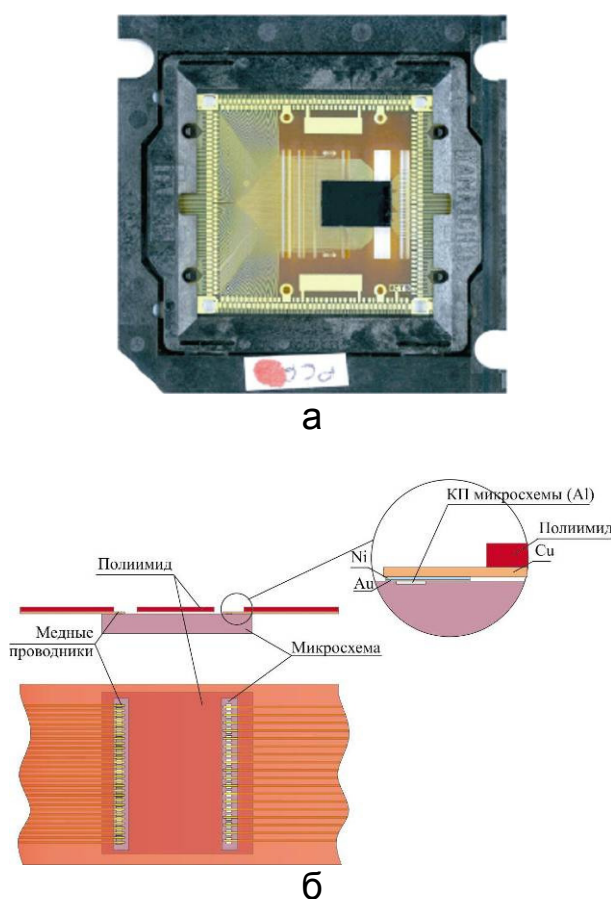


Рисунок 1 – Микросборка на медь-полиимидном носителе:
а – фотография (вид со стороны микросхемы); б – схематическое изображение зон сварки носителя с микросхемой (вид со стороны носителя)

Вышеописанные способы формирования межсоединений обеспечили уменьшение количества сварных соединений в детекторных модулях практически в два раза и позволили значительно упростить сам процесс сборки. При этом в процессе сборки полностью исключена возможность коротких замыканий в областях сварки контактных площадок сенсоров и микросхем с проводниками гибких кабелей и плат. Применение гибких плат специально для микросхем позволяет не только автоматизировать процесс сборки, но и обеспечить полный функциональный контроль микросхем, в том числе по динамическим параметрам и, таким образом, исключить возможность появления брака из-за микросхем при дальнейшей сборке микромодулей.

Тем не менее, и в этом случае остались нерешенными некоторые проблемы, присущие традиционной COF-технологии на основе медь-полиимидных фольгированных диэлектриков. По-прежнему для обеспечения надежного безкоррозионного соединения с алюминиевыми контактными площадками микросхем и сенсоров на медные проводники гибких плат и кабелей необходимо нанесение дополнительных слоев никеля и золота, что усложняет процесс формирования гибких коммутирующих элементов. С этой точки зрения наиболее оптимальным вариантом дальнейшего совершенствования COF-технологии является применение безадгезивных алюминий-полиимидных лакофольговых диэлектриков.

Безадгезивные алюминий – полиимидные диэлектрики, используемые в качестве гибких коммутирующих элементов в COF-технологии, обладают всеми теми достоинствами, которыми обладают и безадгезивные медь-полиимидные материалы. Однако ряд их преимуществ по сравнению с медь-полиимидными диэлектриками позволил существенно расширить возможности COF-технологии на современном этапе развития приборостроения.

Прежде всего, алюминий обладает высокой коррозионной стойкостью. Кроме того, алюминиевая пластина имеет радиационную длину, почти в 6 раз превышающую радиационную длину медной. Несмотря на то, что алюминий по сравнению с медью обладает меньшей механической прочностью; меньшей теплопроводностью, удельным электрическим сопротивлением, примерно в 1,6 раза большим удельного электрического сопротивления меди, важное значение имеет тот факт, что алюминий почти в 3,5 раза легче меди. Благодаря малой плотности алюминия обеспечивается большая электрическая проводимость на единицу массы. Таким образом, коммутирующие элементы на основе алюминий-полиимидных лакофольговых диэлектриков позволяют максимально минимизировать массу вещества в рабочем объеме, что особенно перспективно для сенсорных систем с высокой плотностью каналов информации [5-6].

Алюминиевая COF-технология хорошо адаптируется к современному автоматизированному оборудованию ультразвуковой сварки типа Delvotec. При этом обеспечивается высокое качество и надежность сварных соединений не только из-за того, что свариваются однородные материалы (алюминиевые контактные площадки электронных компонентов и алюминиевые проводники коммутирующих элементов), но также и из-за того, что сварочные электроды, применяемые в сварочных установках, позволяют обеспечить оптимальные режимы процессов сварки. Кроме того, коммутирующие элементы на основе безадгезивных алюминий-полиимидных диэлектриков позволяют значительно улучшить емкостные характеристики электронных устройств.

Специалистами Государственного предприятия Научно-исследовательский технологический институт приборостроения (ГП НИТИП, г. Харьков) разработана и освоена инновационная технология изготовления гибких коммутирующих элементов на основе безадгезивных алюминий-полиимидных лакофольговых диэлектриков и технология сборки гибридных микромодулей и электронных узлов высокой степени интеграции.

Практическое применение предложенные технологии нашли при построении современных систем автоматического управления летательными аппаратами различного предназначения.

Гибкие кабели и платы на основе лакофольговых диэлектриков ФДИ-А-50 и ФДИ-А-24 (полиимидная пластина толщиной 10...20 мкм и алюминиевая толщиной 14...30 мкм) характеризуются пластичностью, гибкостью и стабильностью электрических характеристик и успешно заменяют проволочный монтаж при сборке микромодулей.

Описанную компоновку невозможно реализовать при проволочном монтаже, так как в этом случае объекты сварки должны иметь одностороннее расположение и практически невозможно изменить конфигурацию проводников после сварки.

Алюминиевая COF-технология также позволяет без ограничений располагать на одних и тех же гибких платах вместе с кристаллами микросхем различные навесные компоненты.

В этом случае, в отличие от COB-технологии, SMD-компоненты устанавливаются на платы с помощью гибких алюминий-полиимидных носителей (рис. 2, а). Сначала на гибкие носители с помощью пайки устанавливаются SMD-компоненты (рис. 2, б), а затем гибкие носители с навесными SMD-компонентами монтируются на гибкие платы с помощью ультразвуковой сварки.

Контакты для пайки на носителях формируются путем химического и электрохимического осаждения слоев никеля толщиной 2...3 мкм и олово-висмута толщиной 7...10 мкм. Применение таких гибких носителей с SMD-компонентами позволяет заменять навесные компоненты в процессе проверки функционирования микросборок.

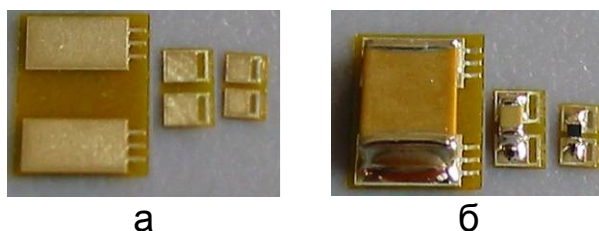


Рисунок 2 – Монтаж SMD-компонентов по COF-технологии с помощью гибких алюминий-полиимидных носителей:

а – гибкие алюминий-полиимидные носители; б – гибкие носители с SMD-компонентами, установленными пайкой

При этом в процессе изготовления микросборок полностью исключается опасность загрязнения основных плат остатками флюсов, а также повышается технологичность слоев гибких плат и сборочных единиц благодаря тому, что нанесение припойных покрытий (Ni-SnBi) и сборка SMD-компонентов на гибких носителях выполняются в ходе отдельных технологических процессов.

Разработанная в ГП НИТИП инновационная технология ультразвуковой сварки алюминий-полиимидных плат и кабелей с микросхемами и приемниками радиационного излучения адаптирована для применения автоматизированных сварочных установок типа FK Delvotec-6400, ЭМ-4370 и др., позволяющих обеспечить точность позиционирования при сварке $\pm 3 \div 5$ мкм.

В качестве основных материалов в разработках использованы безадгезивные алюминий-полиимидные лакофольговые диэлектрики типа ФДИ-А (ЫУО.037.042 ТУ) производства ООО "Тэтраэдр" (г. Москва, Россия) [20].

Лакофольговые алюминий-полиимидные диэлектрики типа ФДИ-А представляют собой алюминиевую рулонную фольгу с односторонне нанесенным полипирометиллитимидным лаковым покрытием с последующей термической (при температуре 300°C в течение 30 мин) имидизацией до состояния собственно полиимида. Пленочные безадгезивные композиции были разработаны и широко применялись в СССР еще в середине восьмидесятых годов [15, 18]. Они нашли широкое применение в производстве лент-носителей ИС и БГИС с числом выводов до 500, гибких шлейфов, многослойных плат с числом слоев до 20 и других изделий, что придавало им легкость, компактность, возможность соединения подвижных частей и формирования трехмерных схем [20-23]. Однако на тот период времени алюминий-полиимидные диэлектрики использовались только для коммутации микросхем с шагом проводников 200 мкм и более.

При участии специалистов ГП НИТИП в разработках гибких кабелей и плат для микромодулей международных проектов CBM, ALICE удалось значительно усовершенствовать сборочную технологию "chip on flex" и адаптировать ее к самым высоким современным требованиям и задачам.

Выводы

Разработанная в ГП НИТИП полностью алюминиевая "chip on flex" технология по сравнению с традиционными технологиями сборки гибридных микромодулей (SMT, COB, TAB) для потенциальных потребителей имеет ряд неоспоримых преимуществ: упрощение конструкции; увеличение плотности монтажа; повышение надежности и снижение трудоемкости процесса изготовления изделий за счет полного

исключения проволочной коммутации; уменьшение габаритных размеров и объема сборочных узлов за счет трехмерной компоновки; минимизация массы изделий и значительное снижение фонового излучения в микромодулях за счет исключения тяжелых металлов (медь, никель, золото и др.); минимизация емкостных характеристик; обеспечение высокой радиационной стойкости и долговечности изделий. При этом одной гибридной микросборкой может обрабатываться до 1000 каналов информации с отношением сигнал/шум не менее 40.

Достигнутый уровень технологии обеспечивает создание многослойных гибких плат и кабелей, а также гибко-жестких плат на пироуглеродных теплоотводящих основаниях с теплопроводностью до 500 Вт/(м·град); одно- и много-кристальных плат для микросхем с шагом выводов 100, 80, 50 мкм и менее и количеством выводов до 200; соединительных гибких кабелей с шагом проводников 100 мкм, количеством трасс до 512 и максимальной длиной до 600 мм; микроплат для межэлементных соединений в многосенсорных приемниках излучений с шагом проводников 50 мкм и количеством выводов до 1024; высоковольтных кабелей с рабочим напряжением до 3000 В и длиной до 300 мм.

Список использованных источников

1. Фарассат Ф. Кристалл на плате (COB): новая эра сборочной технологии / Ф. Фарассат, С. Валиев // Технологии в электронной промышленности. – 2005. – № 6. – С. 71 – 76.
2. Handbook of tape automated bonding. – New York: Van Nostrand Reinhold (edited by John H. Lau). – 1991. – 645 p.
3. <http://www.inaeksu.vstu.vinnica.ua/kafs/mpa/microproc/r2.htm#2.1>.
4. Still A. CDF Run II silicon tracking projects // Nucl. Instr. and Meth. – 2000. – A 447. – P. 1 – 8.
5. Merkel P. et al. CDF Run IIb Silicon Detector: The Innermost Layer // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2004. – Vol. 51, No 5. – P. 2215 – 2219.
6. Tricomi A. The CMS Inner Tracker Silicon Microstrip Modules: Production and test // Nucl. Instr. and Meth.- 2007. – A 570. – P. 248 – 252.
7. List B. The H1 silicon tracker // Nucl. Instr. and Meth. – 2005. – A 549. – P. 33 – 36.
8. www.multichipassy.com.
9. Пырченков В. Гибкие микропечатные платы (Базовый технологический процесс) / В. Пырченков, В. Смирнов // <http://www.ipmce.ru/articles/gibkie-microplaty/>. – 8 с.
10. Бюллер К.-У. Тепло- и термостойкие полимеры / К.-У. Бюллер // Под ред. Я.С.Выгодского. – М.: Химия, 1984. – 1056 с.

11. Бессонова М.И. Полиимиды – класс термостойких полимеров / М.И. Бессонова, М.М. Котон // Под. ред. М.И. Бессоновой. – Л.: Наука, 1983. – 307 с.
12. Астахин В.В. Электроизоляционные лаки, пленки и волокна / В.В. Астахин, В.В. Трезвов, И.В. Суханов. – М.: Химия, 1986. – 158 с.
13. Александрова Л.Г. Перспективные разработки в области гибких фольгированных диэлектриков / Л.Г. Александрова // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 1995. – № 1. – С. 38 – 40.
14. Гончарова Т.С. Полиимидные пленки в качестве межслойных изолирующих и пассивирующих слоев ИС / Т.С. Гончарова // Зарубежная электронная техника. – 1989. – №8 (339). – С.53-82.
15. ECSS-Q-70-71A Space product assurance. Data for selection of space materials and process. – P. 197.
16. www.dupont.com/fcm.
17. Аткин Э.В. Проектирование БИС считывания сигналов микростриповых детекторов по субмикронной КМОП технологии / Э.В. Аткин, Ю.И. Бочаров, А.Б. Симаков // Тр. XLVIII науч. конф. МФТИ “Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук”, Москва-Долгопрудный, 25–26 ноября. – 2005. – Ч. II. Общая прикладная физика. – С. 110 – 111.
18. Lutz J. R., Arnold L., Baudot I. et al. TAB bonded SSD module for the STAR and ALICE trackers // Proceedings of the fifth Workshop on Electronics for LHC Experiments, Crakow, Poland, 11 – 15 Septembe. - 2000. – P. 152 – 156.
19. www.cern.com.
20. ALICE Silicon Strip Detector Module Assembly with Single-Point TAB Interconnections/M.Oinonen, V.Borshchov, A.Listratenko, V.Antonova, I.Tymchuk, M.Protsenko, J.Kostyshin, G.Zinovjev, et al.// 11-th Workshop on electronics for LHC an future Experiments. LECC 2005, Heidelberg, Germany, 12-16 September 2005. – Book of abstracts.– P. 92 – 97.
21. Воробьев В.Н. Материалы для производства печатных плат / В.Н. Воробьев, Л.Л. Ушанева, Е.П. Вишнякова, Р.П. Смолина, А.С. Бекмурзова // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 1993. – № 2. – С. 55 – 57.
22. Худяков К.И. Промышленное производство беспроводочных ИС на ленточном носителе алюминий-полиимид и сборка ИС на ленточных носителях / К.И. Худяков, Е.М. Барабанов // Электронная техника. Сер. 7. ТОПО.– 1983. – Вып. 5 (120). – С. 62 – 64.
23. Журавлев Н.С. Применение рулонных материалов для изготовления новых изделий отрасли фотохимической обработкой / Н.С. Журавлев, Г.И. Лапинский // Электронная техника. Сер. 7. ТОПО. – 1983. – Вып. 5 (120). – С. 41 – 44.