

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МОНТАЖ КРИСТАЛЛОВ ТРАНЗИСТОРОВ ВИБРАЦИОННОЙ ПАЙКОЙ

Леонид Ануфриев, Анатолий Керенцев, Владимир Ланин  
[akerentsev@transistor.com.by](mailto:akerentsev@transistor.com.by)

Авторы статьи, имея многолетний опыт в области сборки и монтажа изделий электроники, активно занимаются разработкой автоматизированных процессов монтажа кристаллов транзисторов вибрационной пайкой в защитной атмосфере. Для обеспечения высокой устойчивости изделий к термоциклическим нагрузкам и высокого выхода годных изделий по электрическим параметрам необходима оптимизация дозы припоя и параметров вибрационной пайки. Оптимизация процесса монтажа кристаллов получить надежный технологический процесс с высокой управляемостью, стабильностью и воспроизводимостью тепловых параметров транзисторов. Представленная информация будет полезна специалистам, работающим в области сборки изделий электроники.

### Проблемы монтажа кристаллов

Эксплуатационная надежность мощных транзисторов определяется, главным образом, их теплоэлектрическим состоянием, которое формируется на стадии присоединения кристалла к корпусу. При этом возможно образование скрытых дефектов (пустоты, микротрещины, сколы), которые приводят к образованию участков под кристаллом с аномально высоким тепловым сопротивлением. Если площадь дефектов невелика по сравнению с площадью кристалла и не затрагивает активной структуры транзистора, то основная часть изделий имеет низкий уровень теплового сопротивления. Однако, в процессе длительной эксплуатации в условиях экстремальных термоциклических воздействий такие изделия могут оказаться потенциально-ненадежными из-за развития микротрещин до активной структуры. Уровень остаточных термических напряжений во многом зависит от качества присоединения кристаллов на припой [1].

Методы монтажа кристаллов на выводные рамки: пайкой эвтектическими сплавами или легкоплавкими припоями, приклеиванием, посадкой на токопроводящую композицию должны обеспечить высокую прочность соединений при термоциклировании и механических нагрузках, низкое электрическое и тепловое сопротивление, минимальное механическое воздействие на кристалл и отсутствие загрязнений.

Если кристаллы приборов имеют значительную мощность рассеяния (более 0,5 Вт), то между подложкой кристалла и посадочной площадкой выводной

рамки необходимо создать токопроводящий электрический контакт с незначительным электрическим и тепловым сопротивлением, что достигается использованием методов пайки. Для тех приборов, в которых мощность рассеяния кристалла невелика, а электрическое сопротивление между подложкой кристалла и рамкой незначительно влияет на работу прибора, то кристалл приклеивают на токопроводящую композицию[2].

Посадка кристалла на эвтектические сплавы помимо технологических трудностей (высокие температуры, золотое покрытие) имеет и другие недостатки. В виду малой пластичности эвтектики Au-Si и разницы в коэффициентах термического расширения кристалла и рамки в напаянном кристалле возникают значительные механические напряжения, что приводит к сколам кристаллов при пайке, последующих технологических операциях и механических испытаниях, а также к снижению надежности приборов.

Тепловую модель мощного транзистора с напаянным кристаллом на кристаллодержатель можно представить в виде трех многослойных параллелепипедов, которые имитируют кристалл с плоским источником тепла на его поверхности, слой припоя заданной толщины и участок кристаллодержателя, ограниченного размерами паяного соединения (рис.1). Тепловое сопротивление напаянного кристалла, исходя из упрощенной тепловой модели [3], можно определить из выражения:

$$R_{thjc} = \sum_{i=1}^3 R_{ti} = \frac{1}{\lambda_{Si}} \int_0^{L_{kp}} \left( \frac{dL}{b + LtgB} - \frac{dL}{a + LtgB} \right) + \frac{L_{np}}{\lambda_{np} \cdot S_{np}} + \frac{1}{\lambda_{cb}} \ln \frac{b+2L}{a+2L} \cdot \frac{a}{b} \quad (1)$$

где  $\lambda_{Si}$ ,  $\lambda_{np}$ ,  $\lambda_{Cu}$  - теплопроводность кристалла, припоя, кристаллодержателя;

$L_{Si}$ ,  $L_{np}$ ,  $L_{cn}$  - толщина кристалла, припоя, кристаллодержателя;  $a$  и  $b$  - размеры источника тепла;  $tgB$  - тангенс угла растекания теплового потока.

При толщине паяного соединения, равной 50 мкм, расчетное значение  $R_{thjc}$  составляет  $0,545^\circ\text{C}/\text{Вт}$  и при этом выполняется необходимое условие  $R_t \text{ расч} < R_{thjc}$ . На зарубежных образцах изделий фирм "Siemens", "International Rectifier" реальная толщина припоя под кристаллом составляет 45–60 мкм.

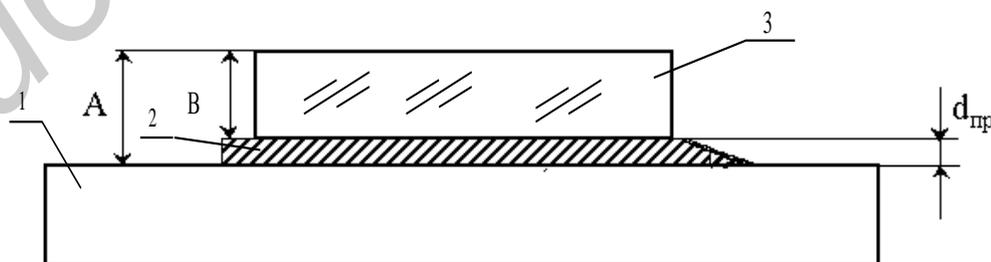


Рис.1. Схема монтажа кристалла:

1 – кристаллодержатель; 2 – припой; 3 – кристалл

При выборе нижнего предела следует иметь в виду то, что существует критическая величина паяного соединения, ниже которой резко снижается надеж-

ность изделий в экстремальных условиях эксплуатации из-за возникновения внутренних механических напряжений, превышающих допустимый уровень для данной конструкции прибора. Согласно [4] для ИМС и полупроводниковых приборов с площадью кристалла более 25 мм минимальная толщина соединения "кристалл-корпус" должна быть не менее 25 мкм. Максимальное напряжение, возникающее при охлаждении кристалла, определяется выражением:

$$\sigma_{\max} = K(\alpha_1 - \alpha_2)(T - T_0)\sqrt{\frac{E_1 E_2 L}{X}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{\max}$  – максимальное напряжение;  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты линейного термического расширения припоя и кремния;  $E_1, E_2$  – модули упругости припоя и кремния;  $T, T_0$  – температуры пайки и окружающей среды;  $K$  – безразмерная константа.

Внутренние напряжения в напаянном кристалле могут достигать 50-65 МПа и при воздействии термоциклических нагрузок привести к образованию трещин в кристалле. Так как при уменьшении толщины припоя внутренние напряжения возрастают, то с целью обеспечения надежности изделий целесообразно выбирать толщину припоя в пределах 25 – 50 мкм.

### **Автоматизация монтажа кристаллов**

Монтаж кристаллов с приложением вибраций амплитудой 0,5 – 1,0 мкм в плоскости основания позволяет обеспечить равномерное растекание припоя и до минимума свести дефекты в паяном соединении в виде пустот [5]. В крупносерийном производстве для присоединения кристаллов к корпусам полупроводниковых приборов широкой номенклатуры вибрационной пайкой эффективен автомат ЭМ-4085-14М фирмы "ПЛАНАР" (Беларусь) (рис. 2), в состав которого входят микропроцессорный контроллер, оптико-телевизионная система распознавания кристаллов, линейный шаговый двигатель перемещения кристаллов, двухкоординатный стол сварочной головки, магазинный механизм автоматической подачи корпусов [6]. Производительность автомата для пайки кристаллов размером от 1×1 до 5×5 мм составляет 2000, для посадки на клей - 3500 и на стеклоприпой – 600 кристаллов в час.

Автоматизированный процесс монтажа кристаллов на припой на автомате модели ЭМ-4085-14М обладает рядом особенностей, позволяющих осуществлять монтаж на выводные рамки из медного сплава, покрытые никелем. Нагреватель в автомате туннельного типа содержит 12 зон контролируемого и регулируемого нагрева до 450<sup>0</sup> С, блок формирования защитно– восстановительной атмосферы смешивает поступающие газы Н<sub>2</sub> и N<sub>2</sub> в смесь 10:90 (формир-газ) для активирующего воздействия на процесс монтажа кристаллов.

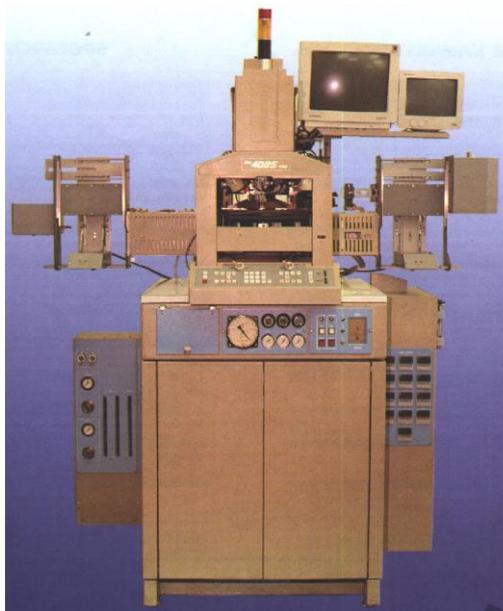


Рис. 2. Автомат присоединения кристаллов ЭМ-4085-14М

Нанесение дозы расплавленного припоя в зону монтажа кристалла осуществляется автоматически проволочным дозатором, при этом программируется не только скорость вращения центрального распределительного вала, но также скорость движения вакуумного захвата и скорость съема кристаллов.

Исследовался процесс монтажа высоковольтных мощных транзисторов типа КТ872 ( $U_{кб}=1500\text{ В}$ ) с размером кристаллов  $5,0 \times 5,0 \times 0,34\text{ мм}$ , содержащими на непланарной стороне систему металлизации Ti-Ni-Ag. Присоединение кристаллов на рамку выводную из медного сплава CuSn-0,15, покрытую слоем никеля толщиной  $3 \div 6\text{ мкм}$ , осуществлялось на припой SnAgSn на автомате ЭМ4085-14М, где обеспечивалось активное движение кристалла в процессе пайки по программируемой траектории.

В качестве припоя использовался проволочный припой  $\varnothing 1,07\text{ мм}$  марки ПСрОСу, намотанный на пластмассовую катушку, закрепленную в дозаторе. Подача припоя в зону лужения осуществлялась линейным шаговым двигателем (ЛШД), на который поступают управляющие импульсы, количество которых предварительно программируется.

Предварительно были определены условия эффективного отрыва капли припоя в зоне лужения кристаллодержателя. Оптимальный диапазон температур дозирования составил  $370\text{--}390^{\circ}\text{ С}$ . При расчете дозы припоя учитывалось, что минимальная толщина припоя под кристаллом должна быть на уровне  $25\text{--}30\text{ мкм}$ . В процессе вибрационной пайки часть припоя выдавливается за пределы кристалла, что составляет порядка 30% от полезного объема припоя, тогда общий объем припоя при дозировке должен быть примерно равен:

$$V_{\Sigma} = V_k + V_n = 0,975\text{ мм}^3. \quad (3)$$

где  $V_k$  – объем капли припоя;  $V_n$  – потери припоя.

При подаче одиночного импульса на дозатор ЛШД перемещает проволоку припоя в активную зону на расстояние  $K$ , равное, примерно 8 мкм, поэтому доза припоя, задаваемая количеством импульсов на ЛШД, составляет:

$$D = \frac{L}{K} = 155,2 \text{ имп}, \quad (4)$$

где  $L$  – расстояние, на которое необходимо переместить проволоку припоя:

$$L = \frac{V_{\Sigma}}{S_{np}} = 1,242 \text{ мм} \quad (5)$$

где  $V_{\Sigma}$  - объем припоя,  $S_{np}$  - сечение проволоки припоя.

Для исследования выбран диапазон дозирования припоя в пределах 120÷225 имп., а температура монтажа кристаллов – на 20÷30° С выше температуры дозирования капель припоя,  $T_m = 380 + 30 = 410^{\circ} \text{ С}$ .

В процессе присоединения кристаллов параметры вибрации: амплитуда и траектория принудительного движения кристаллов программировались. После пайки проводился контроль толщины паяного соединения индикатором часового типа. Измерялись толщины исходного кристалла (размер В), и общей толщины кристалла и припоя (размер А), после чего определялась толщина паяного соединения  $d_{np} = A - B$ .

### Оптимизация параметров вибрационной пайки

Исследованы факторы, определяющие температуру нагрева кристалла и величину остаточных термических напряжений в диапазоне температур пайки:

- толщина паяного соединения;
- сплошность припоя под кристаллом (наличие пустот, непропаев);
- образование зоны локальной деформации на непланарной стороне кристалла, вызванной воздействием металлической иглы механизма съема кристаллов с адгезионного носителя.

Результаты контроля толщины паяного соединения для разных параметров вибрации представлены на рис.3. Контроль выхода годных приборов после изготовления контрольных партий при использовании различных режимов вибрации в процессе напайки кристаллов показал, что при малой дозе припоя (100 имп) выход годных составляет 93,5÷95,0%. При этом малая амплитуда колебаний кристалла в пределах 250 мкм не позволяет получить сплошной паяный шов под кристаллом. При дозах припоя более 150 имп., выход годных находился в пределах 96,3÷97,8%, припой, растекаясь за пределы кристалла, (на величину заданной амплитуды колебаний) эффективно заполняет все пространство под кристаллом, вытекал со всех сторон кристалла. Паяный шов образуется без пор, пустот и щелей.

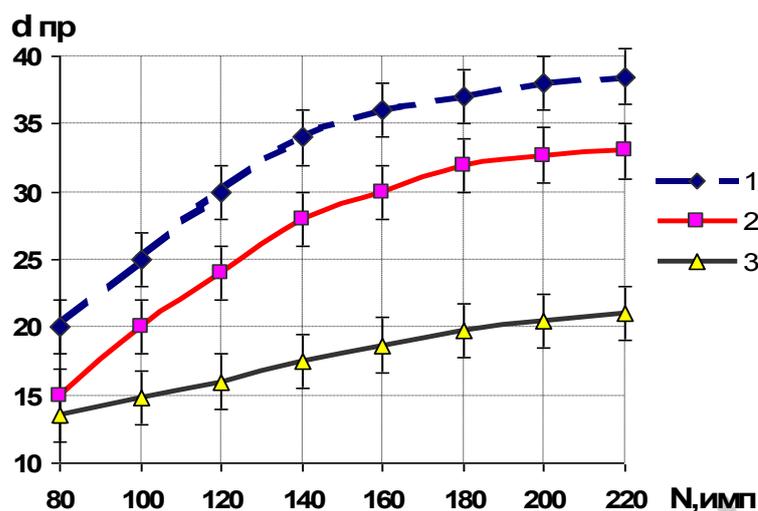


Рис. 3. Зависимость толщины припоя под кристаллом от дозы припоя ( $N_{\text{имп}}$ ) при различной амплитуде колебаний: 1 – 250 мкм, 2 – 500 мкм, 3 – 750 мкм

Для обеспечения толщины паяного соединения кристалл—кристаллодержатель не менее 30 мкм необходимо не только увеличивать дозу припоя более 150 имп., но и уменьшать амплитуду колебаний кристалла в процессе монтажа. Однако применение малых амплитуд вибраций имеет и отрицательное влияние. Так, при амплитуде менее 250 мкм качество паяного соединения ухудшается из-за образований локальных несмоченных припоем участков, располагаемых вблизи центральной части кристалла. При этом площадь непропаев может достигать 25—30% площади активной транзисторной структуры. Образующиеся неоднородности способствуют развитию тепловой неустойчивости однородного токораспределения, искажению теплового фронта и, за счет этого перегреву кристалла. В результате этого отмечается снижение процента выхода годных до 88,2÷93,5%. Увеличение параметров вибрации по координатам x, y и амплитуды вибраций более 750 мкм приводит к эффективному растеканию припоя за пределами активной структуры. При этом толщина под кристаллом очень слабо зависит от дозы и не превышает уровня 15÷22 мкм. При таких высоких уровнях вибрации припой под кристаллом имеет однородную структуру, благодаря этому обеспечивается равномерное распространение теплового потока, что способствует также росту выхода годных до 95,9÷97,6%

При монтаже кристаллов с амплитудой вибраций 500 мкм образуется не только бездефектное паяное соединение как при  $A_{xy}=750$  мкм, но достигается заданная толщина припоя в пределах 30÷35 мкм. Качественное присоединение кристаллов позволяет получить выход годных по электрическим параметрам на уровне 95,5÷97,8%.

Определены требования к величине силы удержания кристалла  $F_{\text{уд}}$  на адгезионном носителе, оптимальная величина которой составляет 0,05 Н. Использование адгезионного носителя с  $F_{\text{уд}} \gg 0,05$  Н для кристаллов площадью 25 мм<sup>2</sup> требует более тщательной настройки работы механизма съема кристаллов. При этом с целью компенсации крутящего момента, приводящего к развороту кри-

сталла или его сбрасыванию с вакуумной присоски, необходимо корректировать в сторону увеличения угла опережения движения иглы подкола. Это приводит к росту динамического воздействия иглы на кристалл и увеличения площади дефектов.

Для оценки эффективности выбранных технологических режимов автоматизированного монтажа кристаллов были проведены сравнительные испытания изготовленных приборов путем воздействия термоударов при  $T = -196 \div +200$  °С,  $n=100$  циклов с замером электропараметров  $J_{КЭК}$ ,  $U_{КЭ НАС.}$ ,  $U_{БЭНАС.}$ ,  $R_{ТЛК}$ , через каждые десять термоударов. Увеличение параметров вибрации  $A_{xy}$  в процессе монтажа кристаллов (рис. 4) приводит к снижению толщины припоя под кристаллом и снижению надежности приборов при термошоковых испытаниях из-за развития термомеханических напряжений в системе кристалл–припой–кристаллодержатель, приводящих к возникновению трещин в кристалле.

Внешний вид припоя под кристаллом после вибрационной пайки и травления приведен на рис. 5а, а для пассивного процесса монтажа, при котором кристалл находится в состоянии статического равновесия под действием силы собственного веса (вариант напайки кристалла в конвейерной водородной печи) на рис. 5б. Для пассивного монтажа характерно образование локальных пустот и непропаев под кристаллом, которые, являясь концентраторами, способствуют росту напряжений более чем в 2 раза после термоциклического воздействия. Это приводит также к ухудшению воспроизводимости по температуре перегрева кристалла, увеличивая  $\Delta T_j$  до  $(40 \div 90)^0$  С и снижая выход годных до  $90 \div 95$  %. Для варианта автоматизированного процесса присоединения кристаллов выход годных составил  $97,2 \div 98,6\%$ , а  $\Delta T_j = (40 \div 55)^0$  С.

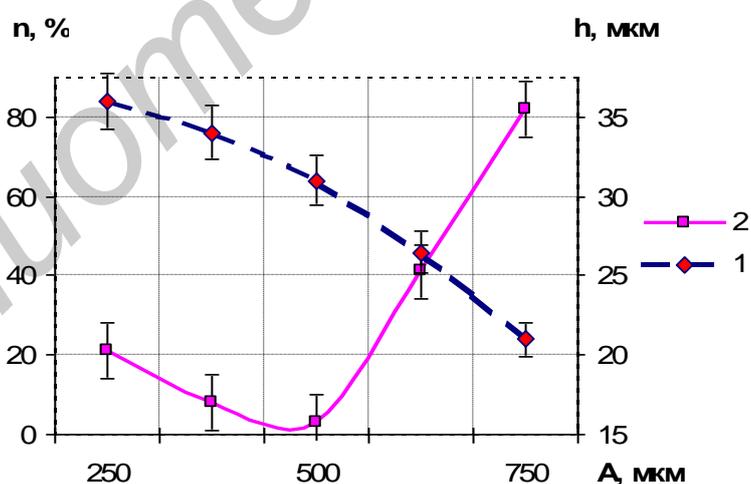


Рис. 4. Зависимости количества отказов и толщины припоя в соединении от амплитуды вибраций:

1 – толщина припоя, 2 – количество отказов после термоударов

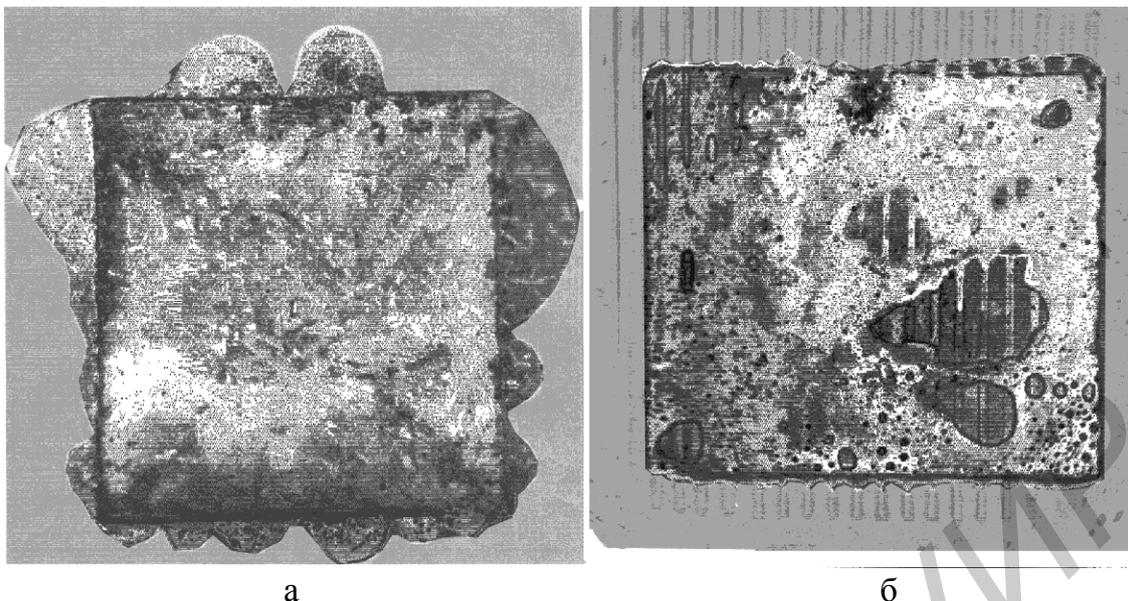


Рис. 5. Внешний вид припоя под кристаллом (кристалл удален травлением):  
а – напайка на ЭМ4085-14М; б – напайка в печи ЖК4007

### Заключение

Автоматизированный монтаж кристаллов вибрационной пайкой приводит к гомогенизации паяного соединения, исключению дефектов в виде пустот и непропаев в результате чего снижается уровень термомеханических напряжений активной структуры, снижается переходное тепловое сопротивление и повышается его воспроизводимость. При амплитуде колебаний кристалла 250 – 500 мкм по криволинейной замкнутой траектории происходит наиболее эффективное удаление окисных пленок и шлаков за пределы активной зоны, обеспечивая равномерную толщину припоя в соединении. Автомат ЭМ4085-14М позволяет осуществлять автоматизированный монтаж на припоей кристаллов площадью 25 мм<sup>2</sup> вибрационной пайкой с высоким качеством соединений и изготавливать высоковольтные мощные транзисторы с выходом годных по электрическим параметрам до 98%. Для обеспечения высокой устойчивости к термоциклическим нагрузкам при  $T = -196 \div + 200^\circ\text{C}$  необходимо тщательно выбирать параметры вибрационной пайки и дозу припоя.

### Литература

1. Синкевич В.Ф. Физические основы диагностирования предельных состояний и обеспечения надежности мощных транзисторов // Электронная промышленность. – 1990. – Вып.6. – С. 19-26
2. Левицкий Л.М. Электропроводящие клеи для микроэлектроники // Зарубежная электронная техника. Научн.-техн. сборник обзоров №7 (339) 1989. – М.: ЦНИИ «Электроника». – С. 62-68
3. Захаров А.Л., Асвадунова Е.И. Расчет тепловых параметров полупроводниковых приборов. – М.: Радио и связь. – 1983. – 184 с.
4. Закс Д.И. Параметры теплового режима полупроводниковых микросхем. – М.: Радио и связь. – 1983. – 128 с.

5. Современное сборочное оборудование для микроэлектроники в Беларуси / Технология и конструирование в электронной аппаратуре.– 1998.– №3-4.– С.7-8
6. Автоматизированный монтаж кристаллов мощных транзисторов / Л.П. Ануфриев, А.Ф. Керенцев, В.Л. Ланин, А.М. Иваш // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2000.–№ 4.–С.32–34.
7. Ануфриев Л.П., Керенцев А.Ф., Ланин В.Л. Статистическое регулирование процесса монтажа кристаллов мощных транзисторов // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология.– 2000. – №3 (26).– С. 29–32.
8. Ануфриев Л.П., Керенцев А.Ф., Ланин В.Л. Электрические и тепловые параметры контактов при монтаже кристаллов в приборах силовой электроники// Электроника и электротехника. –Каунас: Технология. – 2002. –№1 (36). –С. 74-77.

Библиотека БГУИР

**КАРТОЧКА АВТОРОВ**

- 1
1. Фамилия: **Ануфриев**  
2. Имя: Леонид  
3. Отчество: Петрович  
4. Должность: Директор УП “Завод Транзистор” НПО “Интеграл”  
р. тел. , факс +375–17–277-41-41 ,  
E-mail: [lanufriev@transistor.com.by](mailto:lanufriev@transistor.com.by)  
5. Ученая степень: Доктор технических наук  
6. Ученое звание: Профессор  
7. Домашний адрес: 220039, г. Минск, ул. Воронянского, д.3, корп. 1, кв. 49  
8. Год рождения 1946
- 2
1. Фамилия: **Керенцев**  
2. Имя: Анатолий  
3. Отчество: Федорович  
4. Должность: Начальник лаборатории сборки УП «Завод Транзистор» ,  
р. тел. +375-17-278-73-06  
E-mail: [akerentsev@transistor.com.by](mailto:akerentsev@transistor.com.by)  
5. Ученая степень: -  
6. Ученое звание: -  
7. Домашний адрес: 220064, г. Минск, ул. Ландера, д. 72 к. 2, кв. 6  
тел. +375-17-277-32-467  
8. Год рождения 1947
- 3
1. Фамилия: **Ланин**  
2. Имя: Владимир  
3. Отчество: Леонидович  
4. Должность: Профессор кафедры “Электронная техника и технология”  
Белорусского государственного университета информатики и  
радиоэлектроники, р. тел. +375-17-239-88-88,  
E-mail: [ylanin@bsuir.unibel.by](mailto:ylanin@bsuir.unibel.by)  
5. Ученая степень: доктор технических наук  
6. Ученое звание: Доцент  
7. Домашний адрес: 220116, г. Минск, ул. Алибегова, д. 3, кв. 24  
тел. +375-17-271-58-12  
8. Год рождения 1948