

УДК 539.1.074.55

## Системы цифровой регистрации изображения для рентгеновских аппаратов сканирующего типа

А. П. Воробьев, С. А. Горохов, С. Н. Головня, М. К. Полковников, Ю. В. Роднов  
ГНЦ ИФВЭ, Протвино, Московская обл., Россия

Г. И. Айзенштат, О. П. Толбанов  
НИИ Полупроводниковых приборов, г. Томск, Россия

Д. В. Бородин, Ю. В. Осипов  
ООО «РТК Импекс», Москва, Россия

*Представлены результаты разработки систем цифровой рентгенографии сканирующего типа с регистраторами рентгеновского излучения на полупроводниковых детекторах из арсенида галлия. Приведены результаты тестирования систем для флюорографии и дефектоскопии сварных соединений.*

PACS: 06.30.-k

### Введение

В настоящее время в ГНЦ ИФВЭ разрабатываются системы цифровой рентгенографии с использованием полупроводниковых детекторов на арсениде галлия (GaAs). Наиболее близки к практической реализации разработки систем сканирующего типа с линейками GaAs-детекторов. Системы сканирующего типа с линейками чувствительных к рентгеновскому излучению детекторов широко используются при создании медицинской аппаратуры [1—5], однако эти установки имеют ряд недостатков:

- ограниченное пространственное разрешение, вызванное либо конструктивными особенностями чувствительных элементов, как в случае с газонаполненными камерами, либо самим методом регистрации рентгеновского излучения с использованием преобразователя рентгеновского излучения в свет (флюоресцирующими/сцинтиллирующими конверторами) и последующей его регистрацией полупроводниковой фотодиодной линейкой. Пространственное разрешение в таких системах не получено выше 2,5—3 пар линий на миллиметр;

- большие дозы облучения по сравнению с минимально возможными из-за низкой эффективности регистрации рентгеновских лучей.

В системах цифровой рентгенографии, разрабатываемых в ГНЦ ИФВЭ, используются детекторы прямого преобразования рентгеновского излучения в электрический сигнал, изготавливаемые на компенсированном хромом GaAs материале резистивного типа [6].

Детекторы имеют высокую эффективность регистрации квантов рентгеновского излучения

(близкую к 100 % для используемых в медицине энергий рентгеновского излучения) из-за атомного номера и плотности материала. Кроме того, GaAs-детекторы обладают более высокой радиационной стойкостью по сравнению с газонаполненными приборами и кремниевыми фотодиодами, что дает возможность создавать системы регистрации, сохраняющие свою работоспособность в течение всего срока эксплуатации.

Характерной особенностью GaAs-детекторов резистивного типа является линейная зависимость тока детектора от напряжения, подаваемого на него [7]. Такая зависимость позволяет корректировать характеристики детекторов в процессе эксплуатации электронным способом. С практической точки зрения представляет интерес зависимость величины темнового тока GaAs-детекторов от температуры. Из выполненных измерений получено, что при снижении температуры на каждые 20 °C темновые токи микростриповой сборки (см. ниже) уменьшаются примерно в 10 раз [8].

### Детектирующая система

В состав системы регистрации рентгеновского изображения входит линейка детекторов, которая перемещается по проекции изображения объекта в рентгеновских лучах.

Сканирующая линейка детекторов набирается из микростриповыхборок, в состав каждой сборки входят микростриповый детектор с 128 чувствительными элементами (стрипами), две микросхемы по 64 канала каждая и ситалловая плата сопряжения микросхем и детекторов.



На ситалловой плате имеется 20-контактный разъем с шагом 1,27 мм для связи через ленточный кабель с АЦП и оперативной памятью сборки, работа которой контролируется единым для всей системы блоком управления. Микростриповая сборка, АЦП и память образуют автономный модуль системы, с помощью которого можно набирать необходимый размер сканируемого кадра.

Микросхема российского производства К1269ПП1ВН5 [9] осуществляет:

- масштабирование тока от каждого детектирующего элемента с коэффициентом 1; 6 или 60;
- вычитание некоторого, общего для всех каналов, внешним образом задаваемого тока из входного тока каждого канала;
- одновременное интегрирование разностного тока в каждом из 64 каналов с использованием емкостей 12; 3; 1 или 0,25 пФ;
- двойную выборку и последовательную коммутацию на один дифференциальный выход микросхемы;
- выбор интервала времени интегрирования.

Микросхема выполнена в бескорпусном исполнении, размеры кристалла 4,65×2,55 мм. Период расположения каналов 60 мкм.

Микростриповый детектор имеет стрипы шириной 200 мкм и длиной 2,5 мм. Толщина чувствительной области линейки 200 мкм. Рентгеновское излучение вводится в торец микрострипового детектора (т. е. вдоль плоскости стрипов), что при длине стрипов 2,5 мм обеспечивает эффективность регистрации квантов рентгеновского излучения, близкую к 100 %.

На рис. 1 приведена фотография описанной выше микростриповой сборки, показанной для сравнения вместе с измерительной линейкой.

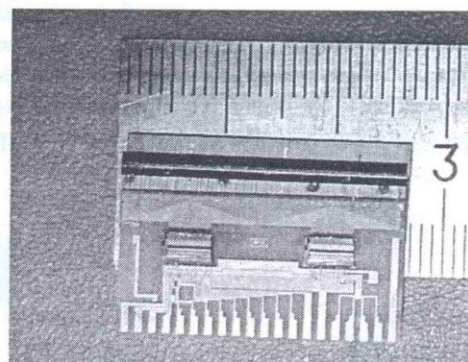


Рис. 1. Фотография микростриповой сборки с измерительной линейкой

При комплектовании сканирующей линейки проводится предварительный отбор микростриповых сборок по статическим и динамическим характеристикам.

Для выбора рабочей температуры микростриповой сборки проводился анализ амплитуд шумовых сигналов на выходе микросборки при различных температурах. Как видно из рис. 2, величина шумового напряжения (при напряжении на детекторе 50 и 0 В) на выходе микросборки становится минимальной в интервале температур 2—7 °С и практически совпадает с уровнем шума при нулевом напряжении на детекторе. Такое зависимое поведение шумового напряжения от температуры сохраняется при всех напряжениях, подаваемых на детектор.

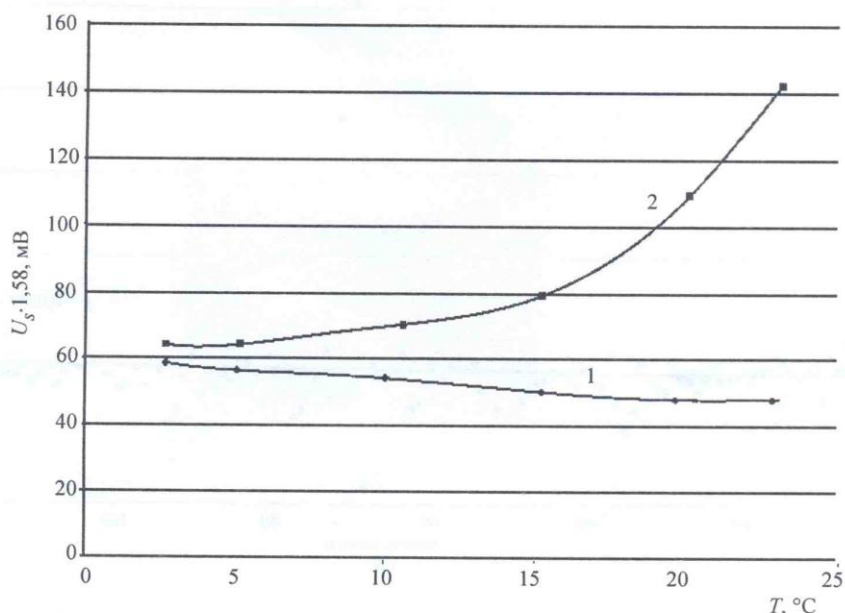


Рис. 2. Зависимость амплитуды шумового напряжения микростриповой сборки от температуры среды: 1 — 0 В; 2 — 50 В

Микросхемы и детекторы подбираются в сборках таким образом, чтобы средние амплитуды отклика детекторов на облучение и их дисперсии для обеих половинок микросборок были примерно одинаковыми. На рис. 3, *a*, *b* приведены средние амплитуды отклика каналов регистрации и их дисперсии при температуре 5 °С и напряжении на детекторе 50 В на облучение от рентгеновской трубки

током 135 мкА и анодном напряжении 100 кВ. Частота опроса каналов 120 кГц. Видно, что каналы имеют большой разброс по своей чувствительности к рентгеновскому излучению. Тем не менее, как будет показано далее, характеристики рентгеновских изображений получаются высокими. У ряда микросборок наблюдаются большие дисперсии отклика каналов на стыке двух микросхем.

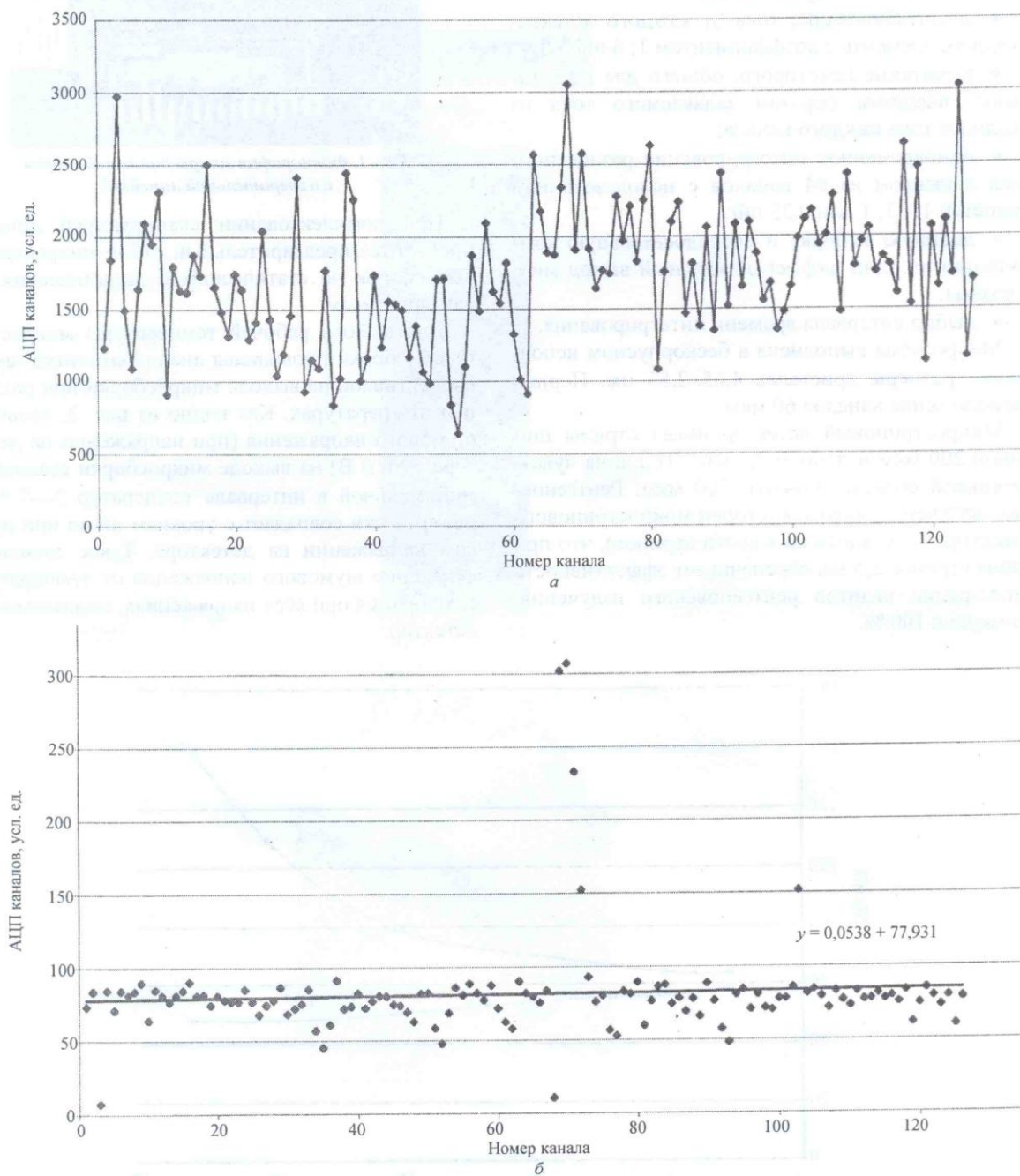


Рис. 3. Амплитуды отклика каналов регистрации микростриповой сборки на рентгеновское излучение: *a* — средние; *b* — дисперсия амплитуд



Конструктивно все микростриповые сборки размещены в термокамере, охлаждаемой с помощью элементов Пельтье до рабочей температуры. Охлаждение теплой стороны элементов осуществляется воздушным путем с помощью вентиляторов. В термокамере может быть расположено от одной до нескольких десятков микростриповыхборок в зависимости от конкретной задачи использования детектирующей системы.

На внешней стороне термокамеры (измерительного модуля) размещены электронные блоки управления и схемы передачи информации в оперативную память измерительной системы. Последняя находится в отдельном от измерительного модуля блоке, что позволяет уменьшить вес сканирующей части системы. Связь с оперативной памятью системы осуществляется с помощью ленточного кабеля.

Изображение, получаемое после прохождения рентгеновского излучения через объект, регистрируется линейкой детекторов (размещенной в измерительном модуле), которая механически перемещается по кадру за время экспозиции. Оцифрованная информация накапливается в оперативной памяти, связанной через адаптер связи с одним из портов контроллера персонального компьютера для выполнения операции чтения. Изображение в цифровой форме вводится в персональный компьютер для последующей обработки.

### Обработка данных и полученные результаты

Полученные данные сохраняются в текстовом формате данных (АЦП). Для снижения уровня искажений изображений, вносимых главным образом поканальной неравномерностью параметров как микрострипового детектора, так и микросхемой считывания, данные обрабатываются для получения индивидуальных поправочных коэффициентов усиления для каждого канала и введения поправок на реальный динамический диапазон.

После приведения всех каналов к единой начальной шкале измерения амплитуд путем вычитания пьедесталов и выравнивания откликов каналов через введение поправочных коэффициентов проводится "маскирование" неработающих каналов путем приписывания им амплитуд, равных средним амплитудам отклика соседних каналов регистрации. Дальнейшее улучшение качества изображения может быть получено при использовании различных математических фильтров и специализированных программных пакетов.

Рентгенографические системы характеризуются рядом параметров, основные из них: пространственное разрешение, контрастная чувствитель-

ность, динамический диапазон. Для каждой конкретной системы определение этих параметров устанавливается соответствующим ГОСТом [10]. Авторами проведены измерения этих параметров в целях определения возможности использования описанной выше системы в рентгенодиагностических медицинских аппаратах и системах диагностики сварных соединений. Так, в измерениях пространственного разрешения системы в составе сканирующего флюорографического аппарата [11] получено разрешение до пяти пар линий на 1 мм (рис. 4), контрастная чувствительность лучше 1 % и динамический диапазон больше 200. Сканирование ведется поперек, вдоль и под углом к штрихам тестового объекта (миры).

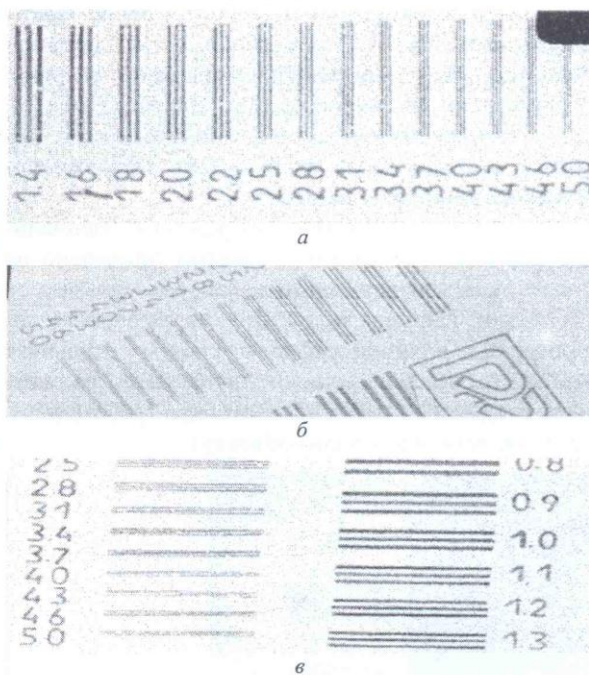


Рис. 4. Снимок миры при различных расположениях штрихов:

а — горизонтальном; б — наклонном; в — вертикальном

На рис. 4 приведены снимки тестового объекта (миры) пространственного разрешения МР-1 0,7—5,0 пар линий на 1 мм при горизонтальном, вертикальном и наклонном положениях миры, напряжение на аноде рентгеновской трубки 100 кВ, ток трубки 7,8 мА, частота опросов детекторов 200 кГц, соответственно.

Контрастная чувствительность < 1 % определена при режимах: напряжение трубки 100 кВ, ток 12 мА, частота опросов детекторов 200 кГц.

Исследования динамического диапазона проводились с использованием клиновидных сертифицированных фантомов из оргстекла и алюминия. Предельная контрастная чувствительность, полу-



ченная авторами на флюорографическом аппарате, в лабораторных условиях составила (0,2—0,3) %. Измерения выполнены в соответствии с ГОСТ Р 51817—2001.

Другим объектом, исследованным на сканирующей системе, было сварное соединение двух стальных пластин толщиной 1 мм, соединенных встык. Расстояние между объектом и фокусом рентгеновской трубки 1 м, расстояние между объектом и детектирующей линейкой 0,3 м. Анодное напряжение на трубке 80 кВ, ток трубки 7 мА. Время экспозиции объекта длиной 150 мм составило 7 с.

В соответствии с ГОСТ 7512—82 класс чувствительности системы контроля сварного соединения определялся по проволочному эталону чувствительности № 11, наклеенному на образец. Система регистрации изображения четко различает проволоки эталона вплоть до 100 мкм (0,1 мм), соответствующих классу чувствительности 1. Исходное рентгеновское изображение сварного соединения приведено на рис. 5, а.

Результаты обработки изображения специализированным программным пакетом приведено на рис. 5, б, в для двух разных наборов параметров обработки. Хорошо видна структура сварного соединения, а наличие цифровых данных позволяет выполнить количественный анализ качества сварного соединения и его соответствие требованиям, предъявляемым к детали (объекту).

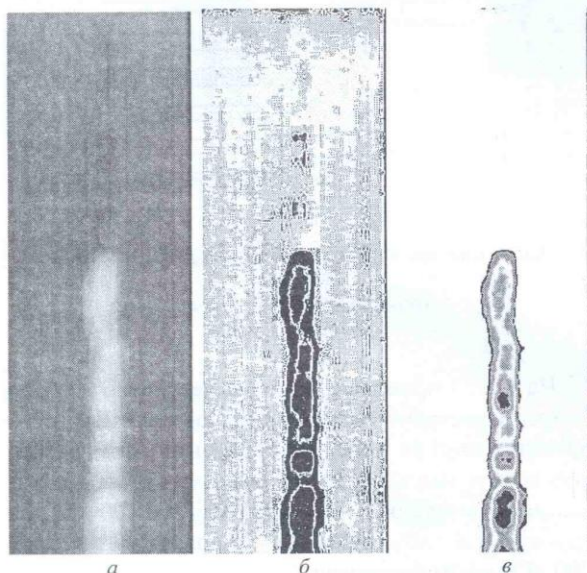


Рис. 5. Рентгеновское изображение сварного соединения: а — исходное; б, в — результаты обработки изображения специализированным программным пакетом

### Заключение

Представленные результаты показывают возможность использования линеек полупроводнико-

вых детекторов из арсенида галлия для создания рентгенографических систем как медицинского, так и промышленного применения.

ГНЦ ИФВЭ планирует организовать у себя производство базового элемента цифрового флюорографического аппарата сканирующего типа — детектирующей системы с линейкой детекторов из арсенида галлия и обеспечить ими производителей рентгеновской аппаратуры.

Следует отметить, что в случае сканирующих линеек ИФВЭ пространственное разрешение может быть легко поднято до 4—5 пар линий на 1 мм. Кроме того, поскольку GaAs-детекторы обеспечивают эффективность регистрации рентгеновского излучения в рассматриваемом диапазоне энергий, близкую к 100 %, то доза облучения пациентов в случае использования GaAs-сканирующих систем является фактически близкой к минимально возможной для аппаратов данного типа. Имеется еще некоторый резерв ее понижения за счет уменьшения шумов электроники, внешних электрических наводок и повышения стабильности источника рентгеновского излучения. Для других сканирующих систем этот предел принципиально недостижим. По пороговому контрасту изображения детектирующие системы ИФВЭ превосходят остальные приборы. Дальнейшее улучшение этого параметра возможно в значительной степени за счет улучшения характеристик источника рентгеновского излучения (монохроматичности, стабильности) и реализации некоторых других схмотехнических решений (например, двух линеек GaAs-детекторов с разной эффективной энергией регистрации).

Немаловажным параметром является также радиационная стойкость детектирующих систем рентгеновских аппаратов, которая определяет их сроки эксплуатации. Проведенные измерения радиационной стойкости GaAs-детекторов показали, что доза в 100 Мрад в  $\gamma$ -лучах не является для них предельной. Сцинтилляторы и флюоресцирующие экраны обладают значительно более низкой радиационной стойкостью, что проявляется в ухудшении характеристик флюорографических аппаратов при длительном их использовании.

Следует отметить, что детектирующие системы ГНЦ ИФВЭ в настоящее время создаются на базе серийно выпускаемой отечественной электроники интегрирующего типа. Однако существует принципиальная возможность создания линеек с единичным счетом квантов излучения. В этом случае появляется возможность разделить кванты рентгеновского излучения по энергии и получить новое качество диагностики, а также возможность улучшения характеристик детектирующей системы до физического предела, задаваемого в этом случае



статистическими флуктуациями рентгеновского пучка и уровнем дискриминации входных импульсов. В остальных детектирующих системах такой подход принципиально невозможен.

### Литература

1. Baru S. E., Khabakhpashev A. G., Makarov I. R., Savinov G. A., Shekhtman L. I., Sidorov V. A. // Nucl. Instr. and Methods. 1985. V. A 238. P. 165.
2. Baru S. E., Khabakhpashev A. G., Shekhtman L. I. // Ibid. 1989. V. A 283. P. 431.
3. Babichev E. A., Baru S. E., Khabakhpashev A. G., Kolachev G. M., Ponomarev O. A., Savinov G. A., Shekhtman L. I. // Ibid. 1992. V. A 323. P. 49.
4. Babichev E. A., Baru S. E., Groshev V. R., Khabakhpashev A. G., Porosev V. V., Savinov G. A., Shekhtman L. I. // Ibid. 1998. V. A 419. P. 290.

5. Yaffe M. J., Rowlands J. A. // Physics for Medicine and Biology. 1997. V. 42. P. 1—39.

6. Ayzenshtat G. I., Babichev E. A., Baru S. E., Groshev V. R., Savinov G. A., Tolbanov O. P., Vorobiev A. P. // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. 2003. V. A 509. P. 268—273.

7. Tyazhev A. V., Budnitsky D. L., Koretskaya O. B., Potapov A. I., Tolbanov O. P., Okaevich L. S., Novikov V. A., Vorobiev A. P. // Ibid. V. 509. P. 34—39.

8. Golovnia S. N., Gorokhov S. A., Tsyupa Y. P., Vorobiev A. P., Koretskaya O. B., Okaevich L. S., Tolbanov O. P. // Ibid. 2002. V. A 494. P. 223—228.

9. Бородин Д. В., Осипов Ю. В., Шушкевич Н. А., Лопухин А. А. // Прикладная физика. 2003. № 1. С. 154—156.

10. Стандарт предприятия 01—22—04. "Приемники рентгеновского излучения рентгеновских диагностических аппаратов с цифровой регистрацией изображений. Номенклатура параметров и характеристик качества изображения, методы и средства их определения". — М.: ВНИИИМТ, 2004.

11. Голубев В. А. // Новые промышленные технологии. 2004. № 6. С. 36—39.

Статья поступила в редакцию 16 мая 2008 г.

## Digital imaging systems for scanning type X-ray apparatus

A. P. Vorobiev, S. A. Gorokhov, S. N. Golovnya, M. K. Polkovnikov, Yu. V. Rodnov  
IHEP, Protvino, Moscow region, Russia

G. I. Ayzenshtat, O. P. Tolbanov  
NIIPP, Tomsk, Russia

D. V. Borodin, Yu. V. Osipov  
RTK "Impeks", Moscow, Russia

*The R&D results of digital scanning type X-ray imaging systems with semiconductor gallium arsenide detectors have been presented. Experimental testing of the systems with fluorography apparatus and defectoscopy of the welding line has been discussed.*

PACS: 06.30.-k

УДК 621.36.5

## Модернизированный измеритель параметров микроТЭМ Пельтье

А. А. Ащеулов, Д. Д. Величук  
Институт термоэлектричества, г. Черновцы, Украина

И. С. Романюк  
ОАО "Кварц", г. Черновцы, Украина

*Представлено краткое описание бесконтактного метода и конструкции измерителя основных параметров термоэлектрических микромодулей (ТЭМ) Пельтье в статическом и динамическом режимах. В качестве датчика температуры и тепловых потоков используется анизотропный термоэлектрический сенсор, работающий в режиме разновременного компарирования.*

PACS: 85.30.-z

### Введение

В настоящее время термоэлектрические охладители Пельтье довольно широко распространены

в измерительной, лазерной и ИК-технике, приборостроении и медицине, а также в других областях науки и техники [1]. Развитие этого направления