

УДК 539.12.043

doi: 10.26583/bit.2024.4.12

Алексей С. Артамонов<sup>1</sup>, Дмитрий В. Бойченко<sup>2</sup>, Анна С. Каменева<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
Каширское ш., 31, Москва, 115409, Россия

<sup>1,2,3</sup>Экспериментальное научно-производственное объединение СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ  
ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ,

Каширское ш., 31, 115409, Москва, 115409, Россия

<sup>1</sup>e-mail: asart@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5158-8292>

<sup>2</sup>e-mail: dvboy@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8382-4675>

<sup>3</sup>e-mail: aspih@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0735-937X>

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ РЕНТГЕНОВСКОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ МАССОВОЙ ТОЛЩИНЫ КОРПУСОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ\*

*Аннотация.* В работе проводится анализ возможности применения типовой установки рентгеновского контроля для оценки массовой толщины корпусов интегральных схем. Проведение подобных оценок необходимо для корректного определения значений линейных потерь энергии ионов при проведении экспериментальных исследований на ускорителях ионов высоких энергий корпусированных изделий микроэлектроники. Представлены предварительные результаты, демонстрирующие такую возможность. Рассмотрены особенности конструкции и работы системы рентгеновского контроля и выявлено, что на результаты оценок оказывает сильное влияние нестабильность характеристик рентгеновской установки, расходимость рентгеновского излучения и точность позиционирования изделия. Обоснован метод оценки массовой толщины корпусов с использованием одновременного облучения клина из известного материала с исследуемым образцом. С целью уменьшения влияния размерных эффектов допускается при наличии такой возможности обрезка части корпуса.

*Ключевые слова:* безопасность информационных систем, массовая толщина, корпуса интегральных схем, система рентгеновского контроля, нуклотрон NICA.

*Для цитирования:* АРТАМОНОВ, Алексей С.; БОЙЧЕНКО, Дмитрий В.; КАМЕНЕВА, Анна С. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ РЕНТГЕНОВСКОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ МАССОВОЙ ТОЛЩИНЫ КОРПУСОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ. Безопасность информационных технологий, [S.l.], т. 31, № 4, с. 165–176, 2024. ISSN 2074-7136. URL: <https://bit.spels.ru/index.php/bit/article/view/1724>. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2024.4.12>.

*\*Благодарности:* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Фундаментальные и прикладные исследования на экспериментальном комплексе класса мегасайенс NICA» № FSWU-2024-0024.

Alexey S. Artamonov<sup>1</sup>, Dmitry V. Boychenko<sup>2</sup>, Anna S. Kameneva<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute),  
Kashirskoe shosse, 31, Moscow, 115409, Russia

<sup>1,2,3</sup>Experimental Research and Production Association SPECIALIZED ELECTRONIC SYSTEMS,  
Kashirskoe shosse, 31, Moscow, 115409, Russia

<sup>1</sup>e-mail: asart@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5158-8292>

<sup>2</sup>e-mail: dvboy@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8382-4675>

<sup>3</sup>e-mail: aspih@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0735-937X>

## **Feasibility Analysis of Using X-ray Inspection Systems for Assessing the Mass Thickness of Integrated Circuit Packages\***

*Abstract.* This paper analyzes the feasibility of using a standard X-ray inspection setup to assess the mass thickness of integrated circuit packages. Such assessments are necessary for accurately determining the values of ion linear energy transfer during experimental studies on high-energy ion accelerators involving encapsulated microelectronic products. Preliminary results demonstrating this possibility are presented. The design and operational characteristics of the X-ray inspection system are discussed, revealing that the results of the assessments are significantly influenced by the instability of the X-ray unit's characteristics, the divergence of the X-ray radiation, and the accuracy of the positioning of the integrated circuits. A method for evaluating the mass thickness of packages is justified, utilizing simultaneous irradiation of a wedge made of a known material alongside the sample under investigation. To minimize the impact of dimensional effects, trimming part of the package is permitted when feasible.

*Keywords:* information systems security, mass thickness, integrated circuit packages, X-ray inspection system, NICA nuclotron.

*For citation:* ARTAMONOV, Alexey S.; BOYCHENKO, Dmitry V.; KAMENEVA, Anna S. Feasibility Analysis of Using X-ray Inspection Systems for Assessing the Mass Thickness of Integrated Circuit Packages. *IT Security (Russia)*, [S.l.], v. 31, no. 4, p. 165–176, 2024. ISSN 2074-7136. URL: <https://bit.spels.ru/index.php/bit/article/view/1724>. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2024.4.12>.

*\*Acknowledgements:* The work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the project «Fundamental and Applied research at the experimental complex of the NICA megascience class» No. FSWU-2024-0024.

## Введение

Безопасность информационно-вычислительных систем в значительной степени зависит от наличия сбоев и отказов входящих в ее состав электронных изделий. Один из возможных источников возникновения сбоев и отказов является низкоинтенсивное излучение высокоэнергичных ионов естественной радиации. Наиболее сильное влияние этот фактор имеет место в космическом пространстве, вследствие чего из-за наличия одиночных радиационных эффектов (ОРЭ) возможна даже полная потеря работоспособности космических аппаратов. Оценки вероятности возникновения частоты ОРЭ в реальных условиях эксплуатации проводится на основе экспериментальной зависимости сечений ОРЭ от линейных потерь энергии (ЛПЭ). Стандартными испытательными установками для определения зависимости сечений ОРЭ от ЛПЭ являются ускорители ионов.

Специальная подготовка образцов для проведения экспериментальных исследований является необходимой и ответственной процедурой при работе на испытательных установках. Удаление элементов корпуса или его утончение требуется для испытаний на тяжелых ионах и низкоэнергетических протонах, когда деградация энергии пучка в корпусе вызывает большую неопределенность энергетического спектра пучка при достижении чувствительной области. В случае устройств с перевернутым кристаллом (технология «Flip-chip», рис. 1) кроме удаления элементов корпуса может потребоваться и утончение подложки для обеспечения того, чтобы пучок достигал активной поверхности кристалла.

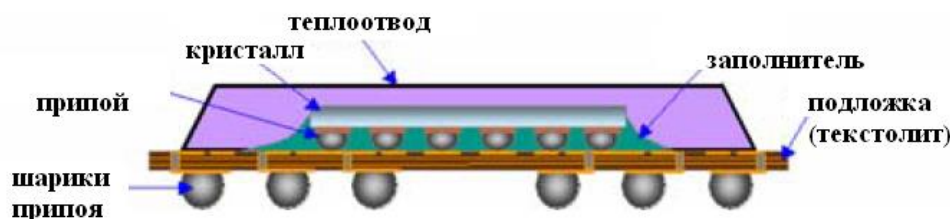


Рис. 1. Поперечный разрез корпуса микроэлектронного элемента, выполненного с использованием технологии «Flip-chip»

В обычной практике радиационных испытаний, как правило, в ходе подготовки образцов к экспериментам обеспечивается непосредственный доступ ионов на поверхность кристалла, но при этом облучение проводится в вакууме. Удаление элементов корпуса или его утончение не требуется при использовании ускорителей протонов с высокими энергиями или тяжелых ионов с энергиями более 100 МэВ/нуклон, когда пробеги ядерных частиц заметно больше, чем толщина корпуса объекта. Однако в этом случае необходимо учитывать потери энергии в материалах корпуса и/или подложки, чтобы корректно определить энергетику в чувствительной области элемента ИС. Но даже в подобной ситуации проводится утончение корпусов с целью уменьшения неопределенности в значениях ЛПЭ.

Тем не менее, нередко имеют место также ситуации, когда полностью или частично конструктивные элементы удалить невозможно, например, в электронных модулях, в специализированных 3D конструкциях и т.п. В этом случае экспериментальные исследования должны проводиться на пучках ионов с достаточно большими энергиями (более 30 МэВ/нуклон), но при этом возникают определенные сложности с оценкой значений ЛПЭ ионов, теряющих энергию в чувствительных элементах ИС.

Повышение достоверности в оценке значений ЛПЭ в чувствительной области кристалла возможно при наличии информации о физико-химическом составе защитных слоев корпуса и их толщинах. Однако, в целом, для проведения подобных оценок достаточно определить массовую толщину конструкций, окружающих чувствительный объем.

## **1. Использование рентгеновского излучения для определения толщины и плотности материалов**

Важнейшим свойством рентгеновских лучей, используемых со времени их открытия до настоящего времени в целях рентгеноскопии, рентгенографии, томографии, рентгеновской дефектоскопии и т.п. является их поглощение в материале. Интенсивность рентгеновского излучения при фиксированной энергии экспоненциально убывает в зависимости от пройденного пути в поглощающем слое, который очень сильно зависит от атомного номера материала [1, 2]. Данное обстоятельство позволяет различать материалы, имеющие разный химический состав, и оценивать их геометрические размеры. Поэтому эти методы широко используются на практике для оценки толщины выпускаемой стандартной продукции, их дефектности и т.п. [3]. Однако неопределенность химического состава материалов, наличие нестандартных конструкций корпусов ИС не позволяет непосредственно применять существующие методы и методики для оценки массовой толщины корпусов изделий электронной компонентной базы.

При производстве электроники широко используется метод рентгенодефектоскопии, также основанный на поглощении рентгеновских лучей, степень которого зависит от плотности среды и атомного номера элементов, образующих материал среды. Оборудование для рентгенографии позволяет получить плоский снимок или трехмерную (объемную) модель исследуемого объекта, а компьютерный анализ снимка или полученной модели позволяет выявить дефекты [4–9]. Информация о дефектах отображается в понятной для оператора форме (например, фотография, на которой дефекты выделены различными цветами).

Типовая схема двухмерной установки рентгенографического контроля приведена на рис. 2 [4]. Она состоит из рентгеновского источника, в качестве которого выступает рентгеновская трубка открытого или закрытого типа, детектора рентгеновского излучения, и устройства для закрепления и манипулирования объектом.

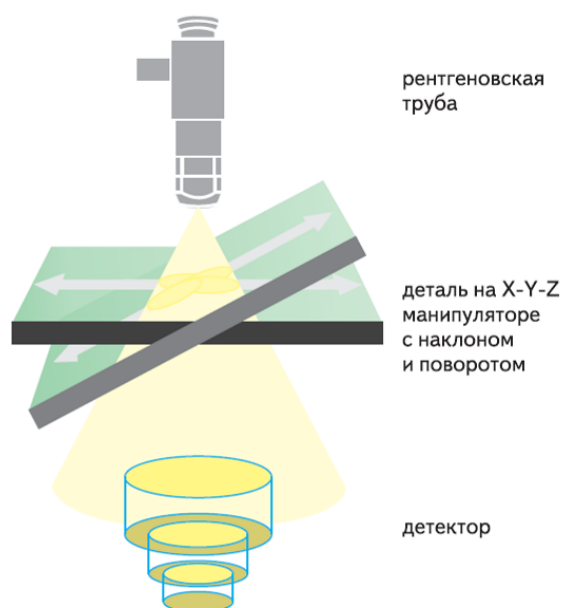


Рис. 2. Типовая схема двумерной рентгеновской системы контроля

Более полное представление дают системы с возможностью получения трехмерного изображения [10–12], однако подобный анализ занимает значительно больше времени и фактически не применим в практике радиационных испытаний. В качестве альтернативы используют двумерные системы с возможностью наклона и поворота объекта, что позволяет оператору проверять объект под разными углами.

Основная особенность схемы диагностики (рис. 3) заключается в том, что объект съемки 2 располагается на определенном расстоянии как от источника излучения 1, так и от приемника изображения 3. Соотношение расстояний  $f_1$  и  $f_2$  определяет коэффициент увеличения изображения  $K = (f_1 + f_2)/f_1$ .

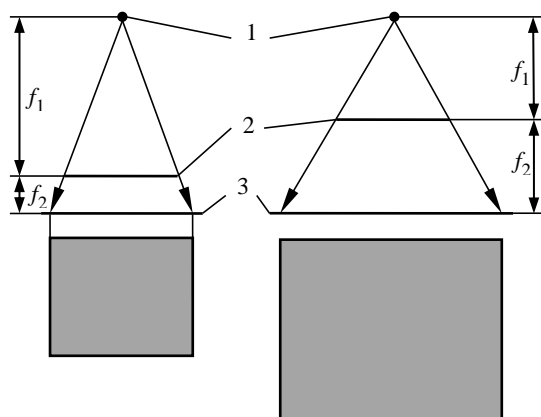


Рис.3. Схема проекционного увеличения при радиационном контроле

Из особенностей диагностики, иллюстрированной рис. 3, следует основной недостаток наиболее широко распространенных рентгенодиагностических систем без трехмерной томографии – значительные искажения изображения для объектов с развитым третьим измерением, связанные с изменяющимся коэффициентом увеличения. На рис. 4 приведен пример подобных искажений для ИС, при попытке получить изображение сечения.



Рис. 4. Снимок ИС в корпусе сбоку

Также существенной особенностью данных систем является формат представления данных в виде файлов изображений, где в силу особенностей формата кодирования цвета пикселя значительно снижен динамический диапазон – до 256 градаций серого несмотря на то, что разрядность АЦП используемых в современных установках детекторов составляет 14...16 бит [13].

## 2. Характеристики рентгеновского стенда

Расчетно-экспериментальные исследования с целью оценки возможности определения массовой толщины защитных слоев корпусов ИС проводились на стенде, созданном на базе настольной системы Unicomr CX3000 (КНР) с рентгеновским источником, характеристики которого представлены в таблице.

Таблица 1. Характеристики рентгеновского источника Unicomr UNMS-U90D

Наименование параметра	Значение
Диапазон напряжения рентгеновской трубки	40...90 кВ
Диапазон тока рентгеновской трубки	0-180 мкА
Материал окна/толщина	Бериллий/0.1 мм
Диаметр окна	8 мм
Угол излучения	45°
Материал анода	Вольфрам

Система Unicomr CX3000 (рис. 5) предназначена для рентгеноскопии с высоким разрешением в первую очередь в электронной промышленности и подходит для контроля различных дефектов печатных плат, таких как пустоты шариков припоя BGA, контроля контактных площадок припоя, подложек кристаллодержателей на наличие отслоений, изгибов соединительных проводов микросхем и др. Изображение с плоскопараллельного детектора можно сохранить в формате JPG.

На рис. 6 представлены расчетные спектры рентгеновского излучения при напряжении на аноде равном 90 кВ за преградой из алюминия различной толщины. Нетрудно заметить, что уже при толщине алюминиевой мишени равной 0,5 мм практически полностью отсутствует мягкая компонента излучения с энергиями менее 10 кэВ.



Рис. 5. Система рентгеновского контроля Unicom CX3000

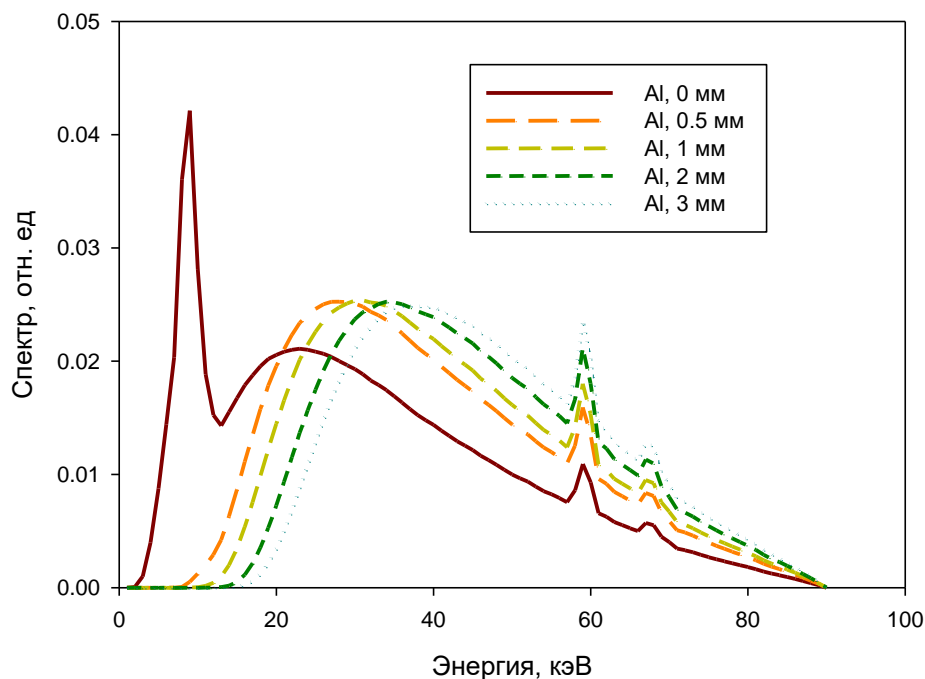


Рис. 6. Расчетные спектры рентгеновского излучения за преградами из алюминия для рентгеновского источника с анодом из вольфрама при напряжении на аноде равном 90 кВ

На рис. 7 в качестве примера представлены зависимости энерговыделения рентгеновского излучения в кремнии от расстояния для рассматриваемого примера.

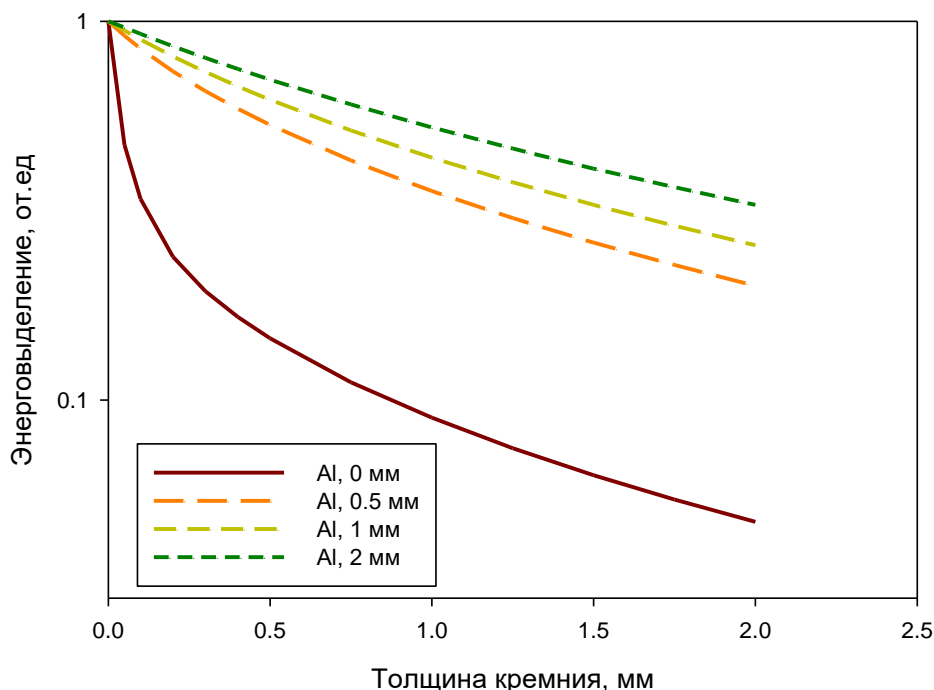


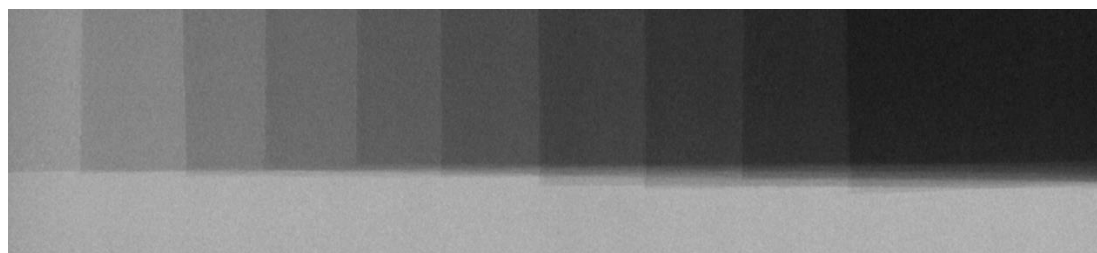
Рис. 7. Расчетные зависимости энергосодержания рентгеновского излучения по глубине кремниевого образца для спектров, представленных на рис. 6

### 3. Экспериментальные результаты

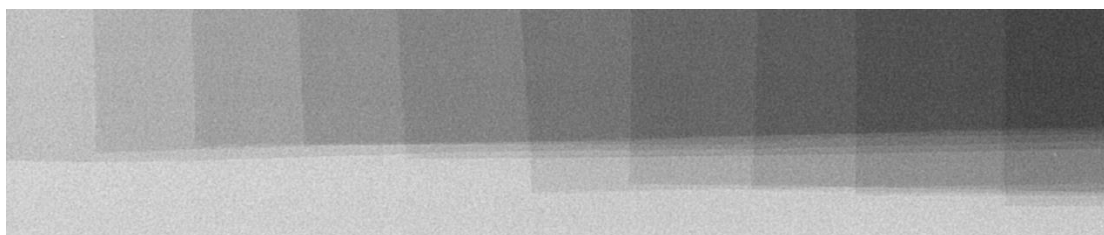
Исследование зависимости уровня серого на изображении от толщины объекта проводилось для клина, набранного из пластин поликарбоната толщиной 0,5 мм. Данный материал выбран по двум причинам. Во-первых, его химический состав близок к химическому составу пластиковых корпусов. Во-вторых, данный материал используется в качестве ослабителя энергии на стенде ИСКРА, входящий в состав нуклотронного комплекса НИКА [14, 15].

На данном этапе предполагалось получить аппроксимирующую кривую для определения толщины объекта. Но, как отмечено в [16], ориентироваться на эти результаты даже для одного и того же исследуемого объекта и одной и той же системы рентгеновского контроля является затруднительным. Для исключения влияния нестабильности системы рентгеновского контроля необходимо обеспечить присутствие на рентгеновском изображении эталона в виде клина, известные характеристики которого позволят точнее определить массовую толщину слоев исследуемого объекта. Наличие эталона позволяет также расширить динамический диапазон путем получения нескольких рентгеновских изображений при разных напряжениях на рентгеновской трубке – своеобразный аналог метода DECT [17].

Именно поэтому на первом этапе проводились исследования клина при напряжении на аноде равном 45 кВ и 70 кВ без применения алюминиевых фильтров. Образцы располагались на расстоянии 10 см в воздухе от анода рентгеновской трубки. В полученных при напряжениях 45 кВ и 70 кВ изображениях клина (рис. 8) для каждой области проводилось усреднение уровня серого по десяти произвольно выбранным точкам. График зависимостей (с вычетом уровня фона) для этих двух напряжений представлен на рис. 9 (черные точки для напряжения на трубке 45 кВ, белые – 70 кВ).



а)



б)

Рис. 8. Инвертированное рентгеновское изображение клина из поликарбоната при напряжении на трубке 45 кВ (а) и 70 кВ (б)

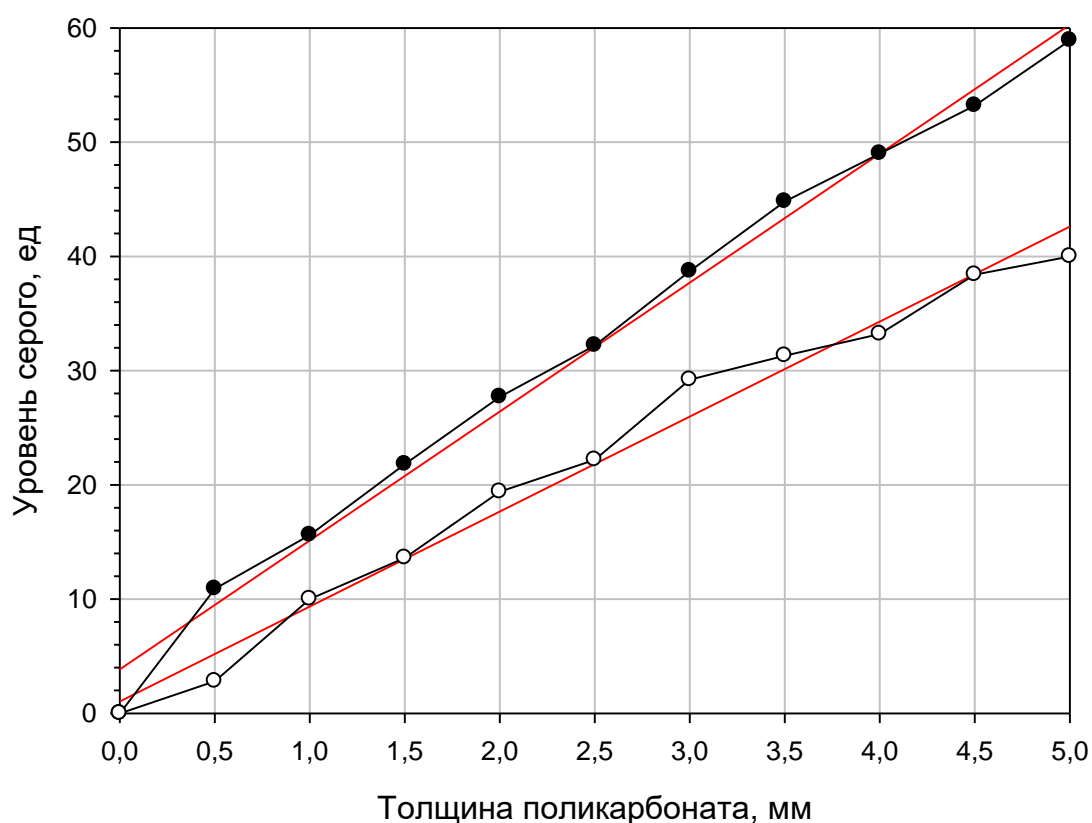


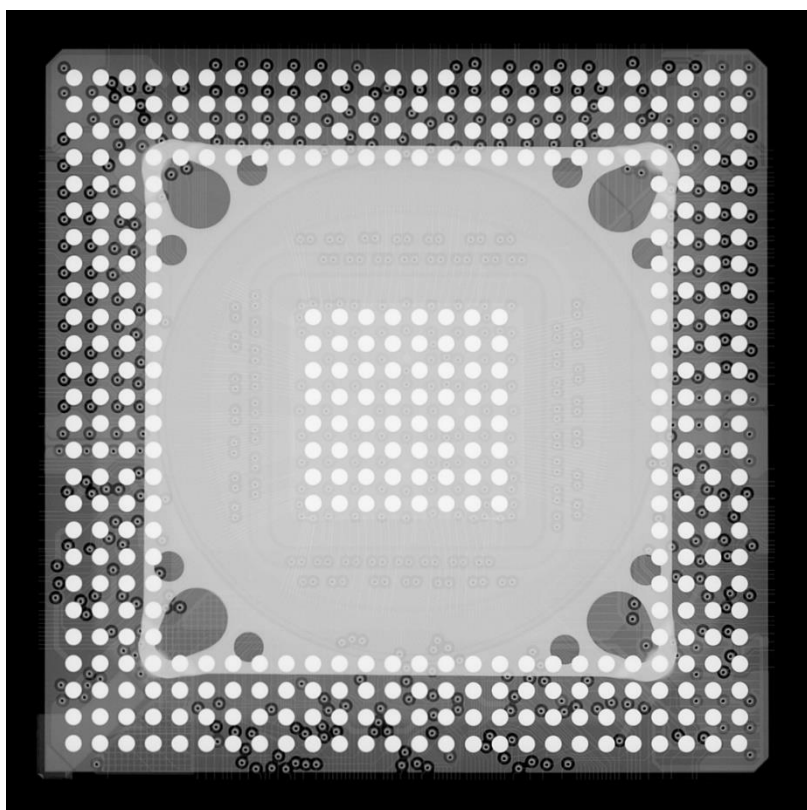
Рис. 9. График зависимостей уровня серого от толщины поликарбоната:  
● – 45 кВ, ○ – 70 кВ, красные прямые линейные аппроксимирующие зависимости

Отличия при напряжениях на аноде 45 кВ и 70 кВ составляют величину около 1,5, что фактически соответствует отношению напряжений.



#### 4. Возможности получения рентгеновского изображения сечения исследуемого объекта

Определение массовой толщины слоев до чувствительного объема по двумерному изображению объекта сверху является непростой, а зачастую и невыполнимой задачей. На рис. 10 приведено рентгеновское изображение СБИС с теплоотводом на текстолитовой подложке с BGA выводами, которое иллюстрирует данное утверждение. Изображение поперечного сечения было бы значительно информативнее, однако в силу особенностей схемы диагностики системы рентгеновского контроля это практически невозможно, что видно на приведенном выше рис. 4, где показано рентгеновское изображение данной СБИС «с торца». Кроме того, даже небольшое отклонение от оси излучения рентгеновской трубки при размещении объекта вертикально, приведет к большим ошибкам. При отсутствии трехмерной томографии единственным возможным вариантом получения данных о массовой толщине слоев до чувствительной области является анализ рентгеновского изображения среза известной толщины, полученного из объекта исследования.



*Рис. 10. Рентгеновское изображение СБИС сверху*

Для подтверждения данного тезиса на прецизионной низкооборотной пиле гравитационного действия был получен срез центральной части СБИС толщиной 5 мм. Его оптическое изображение представлено на рис. 11, а рентгеновское изображение – на рис. 12. Данное рентгеновское изображение уже вполне пригодно к анализу уровня серого для различных областей, измерению толщин слоев и соответственно, получению данных по массовой толщине.



*Рис. 11. Фотография в видимом свете среза СБИС*



*Рис. 12. Рентгеновская фотография среза СБИС*

Несомненный минус такого решения – разрушение объекта исследования. Однако в качестве объекта может и должен выступать образец, уже потерявший работоспособность, например, вследствие других испытаний.

### **Заключение**

Результаты проведенного в статье предварительного анализа возможности применения недорогой системы рентгеновского контроля для оперативной оценки массовой толщины корпусов интегральных схем показывают принципиальную возможность получения этих данных при учете особенностей конструкции и работы системы рентгеновского контроля.

В ходе проведения расчетно-экспериментальных исследований показано, что:

- из-за наличия нестабильности работы рентгеновского источника, влияния условий эксплуатации одновременно с образцом необходимо облучать клин с известным химическим составом и желательно близким к составу исследуемых образцов;
- облучение с торца корпуса ИС является наиболее информативным, но из-за влияния размерных эффектов, не планарности его расположения в поле пучка и расходимости рентгеновского излучения непосредственно данный метод трудно реализуем. Рентгеновский снимок получается пригодным для анализа в случае облучения среза корпуса ИС.

Представленные результаты экспериментальных исследований подтвердили справедливость полученных результатов.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Oliver Mikhail H. Gaerlan Measurement of material thickness using X-ray attenuation. Honors Theses. 2016. URL: <https://scholarsjunction.msstate.edu/honorsthesis/26> (дата обращения: 17.09.2024).
2. Chen Mincong, Li Hongmei, Chen Ziyu, Shen Ji. An examination of mass thickness measurements with X-ray sources. Applied Radiation and Isotopes 66. 2008, p. 1387–1391. DOI: 10.1016/j.apradiso.2008.04.012.
3. Ключев В.В., Артемьев Б.В., Артемьев И.Б., Ключев З.В. Рентгеновская толщинометрия в прокатном производстве цветных металлов. Известия высших учебных заведений. Машиностроение #7(664)/2015. DOI: 10.18698/0536-1044-2015-7-67-78.
4. Франк У., Денеке Н. Современная технология рентгеновского контроля. Технологии в электронной промышленности. 2006, № 1, с. 60–62. – EDN: MUDGTJ.

Алексей С. Артамонов, Дмитрий В. Бойченко, Анна С. Каменева  
АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ  
РЕНТГЕНОВСКОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ МАССОВОЙ ТОЛЩИНЫ КОРПУСОВ  
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

---

5. Лебедев М.Б., Сидуленко О.А., Удод В.А. Анализ современного состояния и развития систем цифровой рентгенографии. Известия Томского политехнического университета. 2008, т. 312, № 2, с. 47–55. – EDN: YLLUTR.
6. Майоров А.А. Цифровые технологии в радиационном контроле. В мире неразрушающего контроля. 2009, № 3(45), с. 5–12. – EDN: SBYGPF.
7. Багаев К.А. Цифровая радиография, обзор технологий и зарубежных стандартов. Экспозиция. Нефть. Газ. 2012, № 7, с. 11–13. – EDN: NVDUCV.
8. Бернард Д., Брайнт К. Использование последних технологических достижений для рентгеновского контроля электронных изделий. Технологии в электронной промышленности. 2012, № 2, с. 16–21. URL: [https://tech-e.ru/2012\\_2\\_34.php?link=1](https://tech-e.ru/2012_2_34.php?link=1) (дата обращения: 19.09.2024).
9. Потрахов Н.Н., Жамова К.К., Бессонов В.Б., Грязнов А.Ю., Ободовский А.В. Технология оперативного рентгеновского контроля изделий из полимерных композиционных материалов. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2015, № 43, с. 97–115. DOI: 10.15593/2224-9982/2015.43.08.
10. Sinka I.C., Burch S.F., Tweed J.H., Cunningham J.C. Measurement of density variations in tablets using X-ray computed tomography. International Journal of Pharmaceutics. 2004, v. 271, p. 215–224. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2003.11.022.
11. Freyburger Ch., Longuetaud F., Mothe F., Constant T., Leban J. Measuring wood density by means of X-ray computer tomography. Annals of Forest Science. 2009, v. 66, no. 8, p. 804. DOI: 10.1051/forest/2009071.
12. Phillips D.H., Lannutti J.J. Measuring physical density with X-ray computed tomography. NDT&E International. 1997, v. 30, no. 6, p. 339–350. DOI: 10.1016/S0963-8695(97)00020-0.
13. Dmitriev A.V. Main trends in radiography. NDT World. 2021, v. 23, no. 4, p. 10–13. DOI: 10.12737/1609-3178-2021-10-13.
14. Сливин А. и др. Сооружение станций для прикладных исследований на ускорительном комплексе NICA. Письма в журнал Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2022, т. 19, № 5(244), с. 421–425. DOI: 10.1134/S1547477122050375.
15. Butenko A.V., Syresin E.M., Tyutyunnikov S.I. et al. Analysis of Metrological Provision Problems of a Test Stand for Testing Radio-Electronic Products for Resistance to Irradiation with High-Energy Heavy Ions. Phys. Part. Nuclei Lett. 16, p. 734–743 (2019). DOI: 10.1134/S1547477119060098.
16. Мирошин К.Г., Косарина Е.И. Определение толщины объекта контроля методом рентгеноскопии. Авиационные материалы и технологии. 2008, № 2. УДК: 621.386.8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-tolschiny-obekta-kontrolya-metodom-rentgenoskopii> (дата обращения: 20.09.2024).
17. Thorsten R. C. Johnson. Dual-Energy CT: General Principles. American Journal of Roentgenology. 2012, v. 199, no. 5 Suppl, p. 3–8. DOI: 10.2214/ajr.12.9116.

REFERENCES:

- [1] Oliver Mikhail H. Gaerlan Measurement of material thickness using X-ray attenuation. Honors Theses. 2016. URL: <https://scholarsjunction.msstate.edu/honorstheses/26> (accessed: 17.09.2024).
- [2] Chen Mincong, Li Hongmei, Chen Ziyu, Shen Ji. An examination of mass thickness measurements with X-ray sources. Applied Radiation and Isotopes 66. 2008, p. 1387–1391. DOI: 10.1016/j.apradiso.2008.04.012.
- [3] Klyuev V.V., Artemiev B.V., Artemyev I.B., Klyuev Z.V. X-RAY thickness gauging in non-ferrous metal rolling. Proceedings of Higher educational institutions. Machine building #7(664)/2015. DOI: 10.18698/0536-1044-2015-7-67-78 (in Russian).
- [4] Frank U., Deneke N. Sovremennaya tekhnologiya rentgenovskogo kontrolya. Technologies in electronic industry. 2006, № 1, с. 60–62 (in Russian). – EDN: MUDGTJ.
- [5] Lebedev M.B., Sidulenko O.A., Udod V.A. Analiz sovremennogo sostoyaniya i razvitiya sistem cifrovoy rentgenografii. Bulletin of the Tomsk polytechnic university. 2008, v. 312, no. 2, p. 47–55 (in Russian). – EDN: YLLUTR.
- [6] Maiorov A.A. Digital technologies in the radiation inspection. NDT World Review. 2009, no. 3(45), p. 5–12 (in Russian). – EDN: SBYGPF.
- [7] Bagaev K.A. Digital radiography, technologies and foreign standards overview. Exposition Oil & Gas. 2012, no. 7, p. 11–13 (in Russian). – EDN: NVDUCV.

- [8] Bernard D., Bryant K. Ispol'zovanie poslednih tekhnologicheskikh dostizhenij dlya rentgenovskogo kontrolya elektronnyh izdelij. Technologies in electronic industry. 2012, no. 2, p. 16–21. URL: [https://tech-e.ru/2012\\_2\\_34.php?link=1](https://tech-e.ru/2012_2_34.php?link=1) (accessed: 19.09.2024) (in Russian).
- [9] Potrakhov N.N., Zhamova K.K., Bessonov V.B., Gryaznov A.Yu., Obodovskiy A.V. Technology of operative x-ray inspection of products from polymeric composite materials. PNRPU Aerospace Engineering Bulletin. 2015, no. 43, p. 97–115. DOI: 10.15593/2224-9982/2015.43.08 UDC 621.384 (in Russian).
- [10] Sinka I.C., Burch S.F., Tweed J.H., Cunningham J.C. Measurement of density variations in tablets using X-ray computed tomography. International Journal of Pharmaceutics. 2004, v. 271, p. 215–224. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2003.11.022.
- [11] Freyburger Ch., Longuetaud F., Mothe F., Constant T., Leban J. Measuring wood density by means of X-ray computer tomography. Annals of Forest Science. 2009, v. 66, no. 8, p. 804. DOI: 10.1051/forest/2009071.
- [12] Phillips D.H., Lannutti J.J. Measuring physical density with X-ray computed tomography. NDT&E International. 1997, v. 30, no. 6, p. 339–350. DOI: 10.1016/S0963-8695(97)00020-0.
- [13] Dmitriev A.V. Main trends in radiography. NDT World. 2021, v. 23, no. 4, p. 10–13. DOI: 10.12737/1609-3178-2021-10-13.
- [14] Slivin A. et al. Construction of stations for applied research at the NICA accelerator complex. Physics of Particles and Nuclei Letters. 2022, v. 19, no. 5, p. 528–531. DOI: 10.1134/S1547477122050375 (in Russian).
- [15] Butenko A.V., Syresin E.M., Tyutyunnikov S.I. et al. Analysis of Metrological Provision Problems of a Test Stand for Testing Radio-Electronic Products for Resistance to Irradiation with High-Energy Heavy Ions. Phys. Part. Nuclei Lett. 16, p. 734–743 (2019). DOI: 10.1134/S1547477119060098.
- [16] Miroshin K.G., Kosarina E.I. Determination of the thickness of the object of control by fluoroscopy. Aviation materials and technologies. 2008, no. 2. UDC: 621.386.8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-tolschiny-obekta-kontrolya-metodom-rentgenoskopii> (accessed: 20.09.2024) (in Russian).
- [17] Thorsten R. C. Johnson. Dual-Energy CT: General Principles. American Journal of Roentgenology. 2012, v. 199, no. 5 Suppl, p. 3–8. DOI: 10.2214/ajr.12.9116.

*Поступила в редакцию – 07 октября 2024 г. Окончательный вариант – 16 ноября 2024 г.  
Received – October 07, 2024. The final version – November 16, 2024.*