

Разработка методики контроля структуры фотодиодных кремниевых мишеней для телевизионных трубок

А. А. Соколова^{1✉}, В. Д. Андреева², В. В. Давыдов³, Д. С. Проводин², А. Э. Ким²

¹ АО «ЦНИИ «Электрон», Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ nanasokol@list.ru

Аннотация. Цель данной статьи состоит в разработке новой методики контроля кремниевых мишеней для трудно идентифицируемых дефектов. В исследовании решалась проблема брака в виде большого белого пятна на изображении с помощью рентгеноструктурного анализа. В ходе работы были выявлены деформации подложки, вызванные некорректно проводимой операцией по запрессовке мишени в трубку, что вызвало механические напряжения, способствовавшие повышению концентрации центров генерации носителей заряда. Также была выявлена альтернативная причина возникновения подобного дефекта – разные коэффициенты расширения вышележащих слоев кремниевой подложки, в результате чего они «растягивают» ее, приводя структуру к искажениям.

Ключевые слова: кремниевая мишень, рентгеновская дифракция, механические напряжения

Для цитирования: Разработка методики контроля структуры фотодиодных кремниевых мишеней для телевизионных трубок / А. А. Соколова, В. Д. Андреева, В. В. Давыдов, Д. С. Проводин, А. Э. Ким // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 10. С. 18–27. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-10-18-27.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность: Выражаем особую благодарность руководству из АО «ЦНИИ «Электрон» – А. А. Грековичу, О. К. Стерлядкину и Н. М. Романову за рецензирование и поддержку.

Original article

Development of a Method for Monitoring the Structure of Photodiode Silicon Targets for Television Tubes

A. A. Sokolova^{1✉}, V. D. Andreeva², V. V. Davydov³, D. S. Provodin², A. E. Kim²

¹ JSC «CRI «Electron», Saint Petersburg, Russia

² Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

³ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ nanasokol@list.ru

Abstract. The aim of this work is to develop a new method for monitoring silicon targets for difficult-to-identify defects. The study solved the problem of defects in the form of a large white spot on the image using X-ray diffraction analysis. During the work, substrate deformations were detected due to an incorrectly performed operation of pressing the target into the tube, which caused mechanical stresses that served to increase the con-

centration of charge carrier generation centers. An alternative cause for the occurrence of such a defect was also identified: different expansion coefficients of the overlying layers of the silicon substrate, as a result of which they «stretch» it, leading to distortions in the structure.

Keywords: silicon target, x-ray diffraction, mechanical stresses

For citation: Development of a Method for Monitoring the Structure of Photodiode Silicon Targets for Television Tubes / A. A. Sokolova, V. D. Andreeva, V. V. Davydov, D. S. Provodin, A. E. Kim // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 10. P. 18–27. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-10-18-27.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgments: We would like to express special gratitude to the to the management from JSC Central Research Institute Electron A. A. Grekovich, O. K. Sterlyadkin and N. M. Romanov for reviewing and support.

Введение. Контроль качества – важная часть любого этапа производства. Различные методы исследования не только позволяют исключать из партий брак, но и дают информацию о причинах его возникновения для дальнейшего предупреждения аналогичных ситуаций.

Подобному многоэтапному контролю качества подвергаются кремниконы ЛИИ479, выпускаемые АО «ЦНИИ «Электрон», в том числе и кремниевая фотодиодная мишень – основной элемент при формировании изображения от объекта.

Однако не во всех случаях методики, используемые на производстве, могут идентифицировать дефект таким образом, чтобы можно было выяснить причину его возникновения и устранить в дальнейшем, что означает необходимость разработки и внедрения новых методов.

Один из таких дефектов – большое белое пятно круглой формы, расположенное прямо по центру изображения, передаваемого с помощью фотодиодной мишени. Данный вид брака появлялся регулярно. Измерительные установки производства фиксировали его, но их возможностей не хватало для того, чтобы установить причину его возникновения и устранить ее.

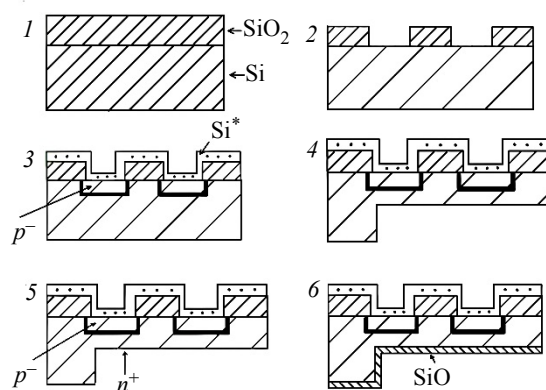
С учетом этой проблемы была поставлена цель будущих исследований: изучить данный дефект и идентифицировать его, используя при этом новую методику контроля, подходящую для изучения подобных видов брака, и в дальнейшем принять меры для устранения проблем в производстве с целью повышения выхода готовой продукции (в процентах).

1. Кремниевая мишень и ее дефекты.

Кремниевая мишень представляет собой матрицу изолированных фотодиодов и выполняет в виде-коне ключевую роль в преобразовании оптического изображения в видеосигнал. Она представ-

ляет собой полупроводниковый слой, на который проецируется изображение. Под действием света на поверхности мишени формируется потенциальный рельеф, сканируемый электронным лучом, взаимодействие которого с локальными зарядами на мишени изменяет ток, проходящий через цепь. Эти изменения тока формируют видеосигнал.

В процессе производства кремниевая подложка приобретает несколько слоев (рис. 1).



- 1 – Окисление O_2 и C_2HCl_3 , наращивание SiO_2 ;
- 2 – фотолитография, создание диодной матрицы;
- 3 – диффузия бора и осаждение поликремния Si^* , создание диффузных p^- областей; 4 – химическое кругление и профиль, создание круглой формы и необходимой толщины; 5 – ионное легирование фосфором, создание n^+ областей; 6 – нанесение просветляющего покрытия

Рис. 1. Технологический цикл создания кремниевой мишени

Fig. 1. Technological cycle of silicon target creation

На первом этапе на кремниевую подложку наносится толстый слой оксида кремния посредством сухого окисления с трихлорэтиленом. Хлор позволяет увеличить напряжение пробоя в диэлектрике и скорость окисления, а также удалить ионы металлов в примеси. Сухое окисление комбинируется с влажным для ускорения процесса.

Наращивание слоя SiO_2 происходит перед первыми тремя фотолитографиями. Всего этих этапов четыре: нанесение знаков совмещения, формирование сетки, печать диодов и создание второй сетки по слою поликремния.

После печати первой сетки необходимо провести ионное легирование фосфором для создания изолированной матрицы.

Перед последним этапом фотолитографии на подложку с окислом осаждается слой поликремния и диффундируется бор с последующей его разгонкой для создания p^- -областей. Поликремний служит диффузионным источником для формирования p - n -перехода. По завершении этих этапов с помощью фотолитографии наносится последняя сетка.

Когда диодная матрица сформирована, пластины подвергаются разбраковке. Прошедшие промежуточный контроль (на оптическом микроскопе визуально изучается сформированная диодная сетка) пластины отправляются на химическое кругление и профильное травление. На этом этапе необходимо получить круглую форму мишени и мембрану толщиной 10 мкм.

Далее следует завершающий этап ионного легирования: со стороны подложки в атомную решетку кремния встраиваются ионы азота и фосфора. Благодаря этому полупроводник приобретает n^+ -проводимость.

Последующий отжиг в атмосфере водорода способствует разгонке легированного фосфора и снижает плотность быстрых состояний.

Завершает технологический цикл нанесения просветляющего покрытия из монооксида кремния SiO . Этот слой необходим для снижения отражения света от поверхности полупроводника, а также роста чувствительности прибора [1].

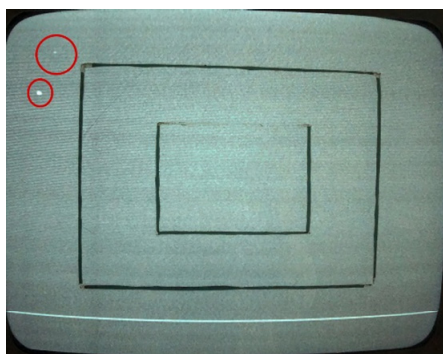
Каждая операция технологического цикла подвергается промежуточному контролю, однако из всех этих этапов можно выделить две основные методики контроля, показывающие наиболее широкую картину дефектности кремниевых мишеней: визуальный контроль с помощью микроскопа и на разборном макете.

Контроль на микроскопе используется для промежуточной разбраковки и в качестве дополнительного этапа после просмотра на разборном макете. С помощью этой методики можно определить поверхностные дефекты: браки фотолитографии (отсутствие сетки или диодов, расхождение шаблонов, некорректно произведенная операция полива фоторезистом), браки осаждения поликремния (шпицы, пузыри), механические повреждения (грязь, царапины), браки травления (подтравы на диодной матрице), включения в просветляющем покрытии или в подложке кремния и др.

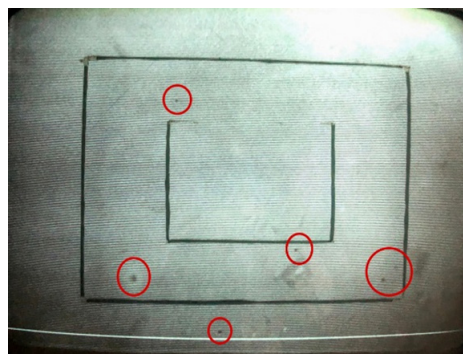
Контроль на разборном макете позволяет исследовать образцы более детально. Эта испытательная установка представляет собой имитацию условий для мишени, идентичные тем, в которых она находится в трубке видикона. Основные показатели, отслеживаемые на этом этапе, – это белые и черные пятна на изображении, полученном с помощью кремниевой мишени (рис. 2).

Белые пятна представляют собой пробой диэлектрика, закоротки и смыкание диодов, причиной которых могут быть вышеописанные дефекты фотолитографии, поликремния и травления.

Черные пятна – это чаще всего грязь или включения (например, примеси в кремнии, в монооксиде кремния, пыль и частицы различных материалов, попавших на поверхность при проведении технологической операции) в слой, нанесенные на кремниевую подложку. Также подобный дефект может возникать из-за оставшихся материалов производства, например плохо удаленного фоторезиста.



а



б

Рис. 2. Дефекты изображения, полученного с помощью кремниевой фотодиодной мишени:
а – белые пятна, б – черные пятна

Fig. 2. Image defects obtained using a silicon photodiode target: а – white spots, б – black spots

Кроме визуального контроля, разборный макет позволяет контролировать параметры фотодиодных пластин: ток сигнала, разрешающая способность, темновой ток, глубина модуляции, геометрические искажения и прочее. Эти данные дают более широкое представление о причинах возникновения брака.

Однако встречаются такие типы дефектов, которые трудно идентифицировать в актуальных условиях производства, – используемая аппаратура способна зарегистрировать аномалию, но понять причину ее возникновения затруднительно. Как правило, это относится к внутренним дефектам.

Один из таких дефектов – большое белое пятно круглой формы, расположенное прямо по центру изображения, передаваемого с помощью фотодиодной мишени (рис. 3).

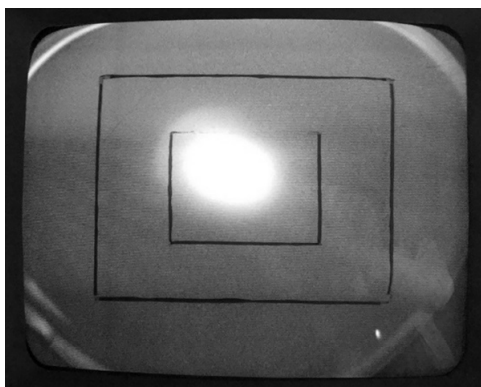


Рис. 3. Изображение с дефектом в виде белого пятна, полученное с помощью кремниевой мишени
Fig. 3. Image with a white spot defect obtained using a silicon target

Важно отметить, что оно проявлялось исключительно после запрессовки пластины в трубку видикона. Наблюдалось как до, так и после нагрева на испытательной установке. Кроме того, мишени с подобным дефектом имели высокие значения темнового тока. В процессе исследования не было обнаружено никакой зависимости ни от партий кремния, ни от партий самих мишеней. Также данные образцы поддавались полной регенерации посредством низкотемпературного отжига в водороде.

Кроме того, с помощью микроскопа была просмотрена дифракционная картина диодной матрицы данной мишени (рис. 4).

В процессе просмотра дифракционной картины был обнаружен след в центре в виде кольца, что говорит о нарушении структуры слоев пластины. Предположительно, такой след мог остаться после запрессовки мишени в трубку видикона.

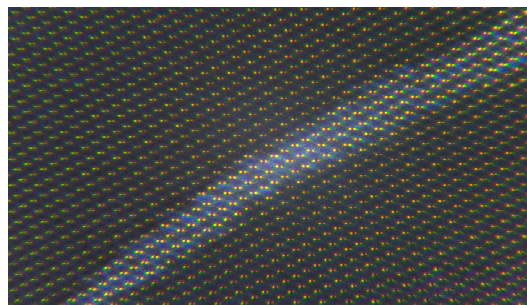


Рис. 4. Фрагмент дифракционной картины дефектной мишени с нарушением структуры слоев в виде кольца
Fig. 4. Fragment of the diffraction pattern of a defective target with a ring-shaped disruption of the layer structure

2. Исследование дефекта с помощью метода рентгеновской дифракции. Ввиду сложной многослойной структуры кремниевой мишени и невозможности пронаблюдать дефект «на поверхности» было принято решение использовать для исследования метод рентгеновской дифракции.

В основе метода лежит получение и анализ дифракционной картины от кристаллического объекта. Этот метод позволяет исследовать образцы как больших, так и малых толщин – от наноструктур до пластин толщиной несколько миллиметров, обладает высокой чувствительностью к несовершенствам кристаллической решетки. Набор дифракционных линий, а также их вид, положение и интенсивность дают информацию о фазовом составе и состоянии кристаллической структуры материала, в том числе – об изменении межплоскостных расстояний или нарушениях ориентировки отражающих плоскостей, которые могут быть связаны с локальными деформациями решетки в местах расположения дефектов [2].

Немаловажно, что рентгеновская дифрактометрия – неразрушающий метод, и это стало преимуществом для данного исследования ввиду сложности извлечения бракованных мишеней из трубок видиконов и необходимости подбора оптимального режима контроля.

Для работы был выбран рентгеновский дифрактометр Rigaku SmartLab X-RAY diffractometer с медным фильтрованным (Ni) излучением ($\lambda_{Cu} = 0.15418$ нм) и программное обеспечение DiffraC Eva V5.0 для интерпретации полученных данных.

В качестве исследуемых образцов были отобраны несколько эталонных мишеней и мишень с дефектом белого пятна. Первым этапом стал подбор оптимального режима съемки на рентгеновском дифрактометре с использованием эталонных образцов и последующим усреднением полученных данных.

Было установлено, что для первичного анализа достаточно диапазона угла дифракции (угла между падающим и дифрагированными лучами, который регистрирует детектор) 2Θ от 0 до 50° с шагом 0.02° . По итогам такого наблюдения был получен фазовый состав для эталонной и дефектной пластин (рис. 5).

Интенсивности пиков соответствуют заявленным концентрациям веществ в материале. Помимо интенсивных пиков кремния обнаружены слабые рефлексы его соединений – SiB_6 , SiB_3 , SiP_2 и др., – что считается допустимым.

По данным этих съемок был сделан вывод о том, что фазовые составы в обоих образцах соответствуют норме, из чего следует, что технологический процесс производства кремниевой мишени был произведен корректно. Однако были обнаружены существенные различия на пиках, отражающих кремниевую подложку. Структура Si эталонной мишени характеризуется преимущественной ориентацией (111), что видно по высокой интенсивности соответствующего пика (рис. 6). Также на графике можно увидеть пики K_β -Si 111 и Si 220, где K_β -Si 111 – это дублет основного характерного пика Si 111 от монокристаллической подложки, вызванный излучением K_β той же рентгеновской трубки дифрактометра. Он появля-

ется из-за того, что трубка испускает другое характерное излучение – K_β -линию, чья длина волны составляет примерно $\lambda(K_\beta) = 1.3922$ нм, это излучение гораздо слабее, а также подавляется фильтрами, из-за чего его интенсивность на графике меньше. Пик Si 220 характеризует слой поликремния, который присутствует в структуре кремниевой мишени.

У дефектной же мишени наблюдается значительное снижение интенсивности линии Si 111 кремния, дифракционная картина кремния практически соответствует поликристаллическому состоянию материала.

По этой картине можно сделать вывод о том, что в случае с дефектным образцом отсутствует монокристалльный эффект, что обязательно должно быть присуще монокристаллической кремниевой подложке.

3. Расчет микродеформаций. Исходя из полученных данных, можно предположить, что в кристаллической решетке кремния присутствуют деформации. Для проверки этого тезиса была сделана съемка на микронапряжения в центре и с края образцов с использованием их вращения в плоскости держателя для устранения эффекта крупнозернистости и усреднения информации по площади (рис. 7).

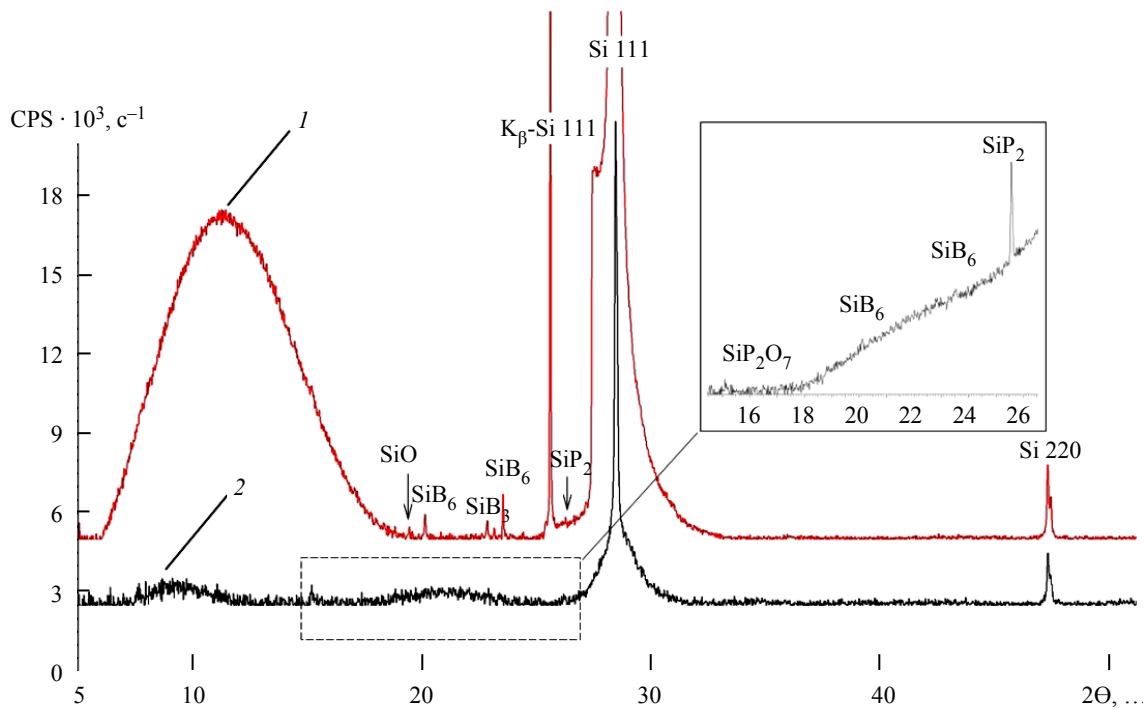


Рис. 5. Фазовый состав эталонной мишени (1) и мишени с дефектом (2), где CPS – мера интенсивности (количество импульсов в секунду), а $\lambda K_{\alpha_1} = 1.54060$ Å – длина волны излучения медного анода

Fig. 5. Phase composition of the reference target (1) and the target with a defect (2), where CPS is a measure of intensity (counts per second) and $\lambda K_{\alpha_1} = 1.54060$ Å is the wavelength of the copper anode radiation

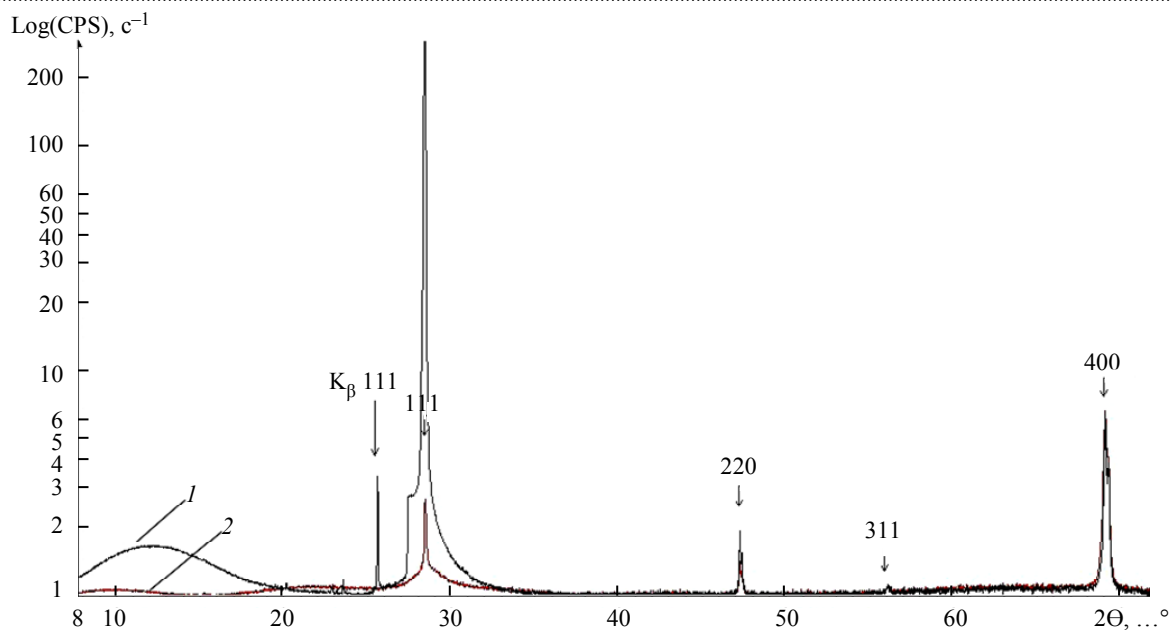


Рис. 6. Преимущественная ориентировка кремния в эталонном (1) и дефектном (2) образцах
 Fig. 6. Preferential orientation of silicon in the reference (1) and defective (2) samples

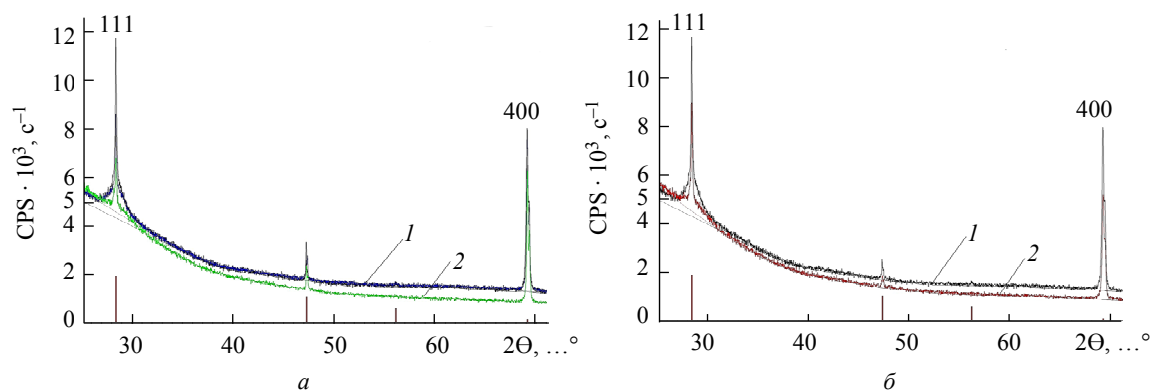


Рис. 7. Результаты съемки на микронапряжения для эталонного (а) и дефектного (б) образцов в центре (1) и с края (2), где $\lambda K_{\alpha_1} = 1.54060 \text{ \AA}$

Fig. 7. Results of microstress survey for the reference (a) and defective (b) samples in the center (1) and from the edge (2), where $\lambda K_{\alpha_1} = 1.54060 \text{ \AA}$

Это исследование направлено на выявление наличия и значений микронапряжений в материале с использованием рентгеновской дифракции. Метод основан на том, что микронапряжения, возникающие в кристаллической решетке, приводят к уширению дифракционных линий.

Получив данные графики (рис. 7), для дальнейших расчетов выбрали пики 111 и 400, так как они имеют наибольшую интенсивность, а также на дифрактограмме расположены достаточно далеко друг от друга. Несмотря на то, что кремниевая подложка монокристаллическая, наблюдение пика 400, близкого по интенсивности к пику 111, возможно, так как съемка на дифрактометре проводилась в геометрии скользящего падения. В этом режиме отображается полная дифракционная картина от объемного кристалла кремния и приповерхностной области.

Уширение пиков может быть связано как с микроискажениями (проявляются в большей степени на больших углах 2θ), так и с измельчением размеров кристаллитов (на малых углах). Для анализа необходимо рассмотреть ширину пиков, потому что именно она дает информацию о дефектности структуры.

С помощью программного обеспечения Diffrac Eva V5.0 рассчитаны полуширины β и определены размеры кристаллов (D), при этом были выделены α_1 – составляющие дублетов ($\lambda_{\alpha_1} = 0.15406 \text{ нм}$, т. е. были выбраны только те пики, которые вызваны K_{α} -линией – основным излучением рентгеновской трубки, исключая дублеты K_{β}), и учтены инструментальные характеристики прибора (эталон – корунд $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) (рис. 8).

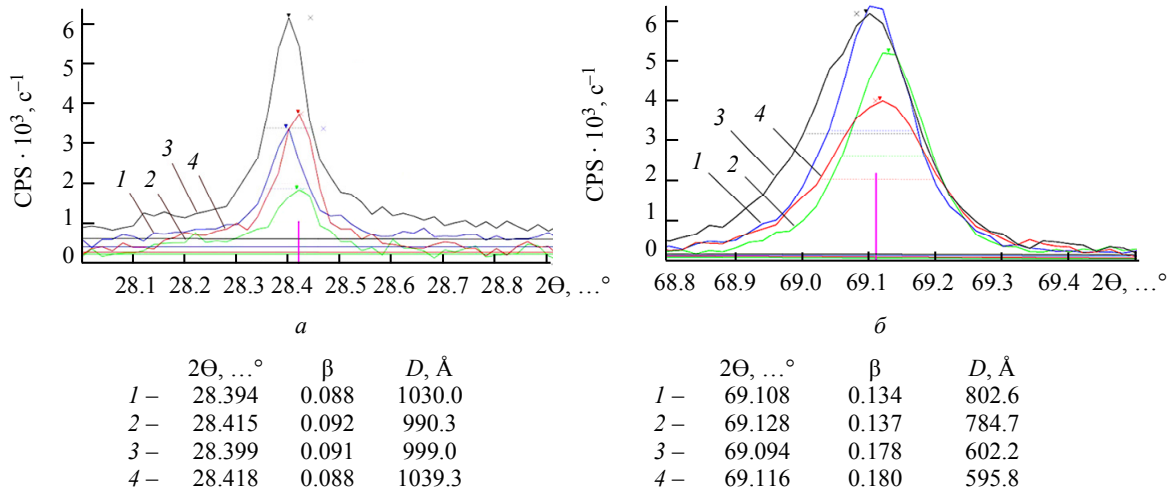


Рис. 8. Пики с ориентировкой 111 (а) и 400 (б) для эталонной (1 – центр, 2 – край) и дефектной (3 – центр, 4 – край) мишеней, где $\lambda K_{\alpha_1} = 1.54060 \text{ \AA}$

Для того чтобы определить характер дефектов, необходимо воспользоваться неравенством

$$\frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} \leq \frac{\beta_2}{\beta_1} \leq \frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_1}, \quad (1)$$

где β_1, β_2 – физические уширения пика 111 и 400; θ_1, θ_2 – углы, на которых наблюдаются пики 111 и 400.

Согласно (1), если равенство устанавливается между отношениями косинусов и физических уширений, то это говорит о влиянии только ОКР (области когерентного рассеяния, в значительной степени связанной с дислокациями), если равенство между отношениями тангенсов и физических уширений, – то присутствуют только микродеформации.

Для эталонной мишени получились следующие неравенства:

$$1.2 \leq 2.1 \leq 2.7; \quad (2)$$

$$1.2 \leq 1.92 \leq 2.7. \quad (3)$$

Для центральной (2) и краевой (3) частей неравенства получились верными, что говорит об одновременном влиянии и микродеформаций, и ОКР.

Такие же неравенства были составлены для дефектного образца:

$$1.2 \leq 2.7 \leq 2.7; \quad (4)$$

$$1.2 \leq 3.1 \leq 2.7 \quad (5)$$

Из неравенств для центральной (4) и для краевой (5) областей следует, что и в центре, и (очевидно, в большей степени) в краевых областях дефектной мишени можно говорить о существенно деформированном нестабильном состоянии образца.

Чтобы оценить наличие и размеры возможных деформаций, необходимо определить микродеформационную характеристику ОКР – D , и распределенную микродеформацию – ϵ . Для их вычисления был произведен расчет методом Шеррера с помощью построения Вильямсона–Холла:

$$\frac{\beta \cos \theta}{\lambda} = \frac{1}{D} + \frac{4\epsilon \sin \theta}{\lambda}, \quad (6)$$

где β – физическое уширение; θ – угол, на котором наблюдается пик; λ – длина волны источника излучения рентгеновского дифрактометра.

Согласно (6), данный расчет по рефлексам 111 и 400 Si показал результаты, представленные в таблице.

Расчетные значения D и ϵ
Calculated values of D and ϵ

Тип образца	Центр		Край	
	$D, \text{нм}$	ϵ	$D, \text{нм}$	ϵ
Эталон	318.6	0.0005	240.8	0.0005
Дефект	2533.5	0.0010	525.7	0.0010

Из расчетов видно, что эталонный образец имеет достаточно однородную по своей площади структуру ($D = 240 \dots 318 \text{ нм}$) с невысоким уровнем микронапряжений до $5 \cdot 10^{-4}$. В дефектной же мишени деформации в 2 раза выше, не наблюдается монокристалличности кремния и размеры ОКР увеличиваются от 525 нм с краю до более двух микрометров в центре мишени.

Полученные данные говорят о значительных искажениях в структуре кремниевой подложки, особенно в центре образца с белым пятном.

Обсуждение результатов. Принимая во внимание поведение дефекта в виде белого пятна, в особенности – исчезновение скопления заряда в центре после низкотемпературного отжига, можно сделать вывод, что его появлению предшествует повышение концентрации центров генерации носителей заряда. Одна из причин, влияющая на это, – механические напряжения [3]. Учитывая выявленные нарушения в структуре кремниевой подложки, высокие показатели микродеформаций, сосредоточенных в центре дефектной мишени, а также дифракционную картину с искажениями в виде кольца, было сделано заключение, что в данном случае причиной возникновения дефекта послужили именно они. Подвергнуться механическим напряжениям мишень могла, в первую очередь, при запрессовке в трубку видикона. Для предупреждения этой ситуации необходимо обратить особое внимание на процесс запрессовки: убедиться, что образец ровно располагается в оснастке, отрегулировать параметры, отображающие усилие, с которым мишень прессуется на индиевое кольцо, регулярно аттестовать установку для проведения данной операции.

Кроме того, существует предположение о том, что деформации в кристаллической решетке могли возникнуть из-за разных коэффициентов расширения вышележащих слоев кремниевой подложки, в результате чего они «растягивают» ее, приводя структуру к искажениям. Проблема подобного рода должна решаться усиленным промежуточным контролем: необходимо измерять толщину и равномерность каждого нанесенного на подложку слоя.

Выводы и заключение. В ходе исследования были решены поставленные задачи.

Была собрана информация о дефекте, и, установив невозможность идентифицировать его внешне или с помощью разборного макета, для исследования был выбран метод рентгеновской дифракции для изучения внутренней структуры мишени.

Проведен анализ эталонных и дефектного образцов, подобраны режимы съемки, в результате чего было заключено, что образцы не отличаются по фазовому составу, однако присутствуют различия в структуре кремния.

Для дефектного и эталонного образцов проведен расчет на микродеформации, который показал, что размер области когерентного рассеяния (микродеформационная характеристика) в эталонном образце изменяется равномерно, когда как в дефектной мишени ОКР увеличивается от 525.7 нм до 2.5 мкм от края к центру, а распределенная микродеформация в дефектном образце выше в 2 раза, чем в эталонном. Наличие деформаций установили в центре.

Установлено, что дефект проявляется из-за повышения концентрации центров генерации носителей заряда, причиной которому служат механические напряжения. Их появление может быть обусловлено разными коэффициентами расширения вышележащих слоев кремниевой подложки, что приводит к ее деформации или механическим воздействиям во время запрессовки мишени в трубку. Также не исключено воздействие одновременно двух факторов.

По результатам исследования сделан вывод о целесообразности использования методов рентгеновской дифракции как методики контроля. Данный метод хорошо себя показал в работе с внутренними дефектами. С его помощью удастся исследовать структуру полупроводника по слоям, что позволяет установить причину возникновения дефекта на конкретной стадии производства и существенно экономит ресурсы. Однако метод рентгеновской дифракции достаточно затратен по времени – в условиях производства невозможно контролировать таким образом каждый образец. Именно поэтому данная методика предпочтительна к применению в случае возникновения сложного вида дефектов, которые появляются регулярно.

Список литературы

1. Патракова А. Я. Монокристаллические кремниевые мозаичные мишени для телевизионных трубок. М.: ЦНИИ «Электроника», 1972. 42 с.
2. Боуэн Д. К., Таннер Б. К. Высокоразрешающая рентгеновская дифрактометрия и топография. СПб.: Наука, 2002. 274 с.

3. Напряжения и деформации в элементах микросхем / В. С. Сергеев, О. А. Кузнецов, Н. П. Захаров, В. А. Летагин. М.: Радио и связь, 1987. 88 с.

Информация об авторах

Соколова Анастасия Андреевна – бакалавр техн. наук по направлению «Космические и наземные радиотехнические системы», инженер-технолог АО «ЦНИИ „Электрон“», пр. Тореза, д. 68, лит. Р, Санкт-Петербург, 194223, Россия.

E-mail: nanasokol@list.ru

<https://orcid.org/0009-0007-7275-9824>

Андреева Валентина Дмитриевна – канд. техн. наук, доцент Высшей школы физики и технологий материалов Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.

E-mail: avd2007@bk.ru

Давыдов Вадим Владимирович – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры фотоники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: davydov_vadim66@mail.ru

Проводин Даниил Сергеевич – магистр техн. наук по направлению «Лазерные и оптоволоконные системы», аспирант на направлении «Физика конденсированного состояния» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.

E-mail: provodindanya@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-7007-9215>

Ким Артем Эдуардович – магистр техн. наук по направлению «Технологии композитов и наноматериалов», инженер Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.

E-mail: artem_7.kim@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2276-1359>

Вклад авторов:

Соколова А. А. – сбор данных о дефекте белого пятна; обработка экспериментальных данных; анализ полученных результатов; написание исходного текста; итоговые выводы.

Андреева В. Д. – интерпретация данных, полученных с помощью рентгеновского дифрактометра; расчет на микродеформации методом Шеррера; анализ экспериментальных данных, написание итогового текста.

Давыдов В. В. – обработка экспериментальных данных; итоговые выводы.

Проводин Д. С. – контроль дифракционной картины диодной матрицы с помощью микроскопа.

Ким А. Э. – проведение измерений на рентгеновском дифрактометре.

References

1. Patrakova A. Ja. Monokristallicheskie kremnievye mozaichnye misheni dlja televizionnyh trubok. M.: CNII «Jelektronika», 1972. 42 s. (In Russ.).

2. Boujen D. K., Tanner B. K. Vysokorazreshajushaja rentgenovskaja difraktometrija i topografija. SPb.: Nauka, 2002. 274 s. (In Russ.).

3. Naprjazhenija i deformacii v jelementah mikroshem / V. S. Sergeev, O. A. Kuznecov, N. P. Zaharov, V. A. Letjagin. M.: Radio i svjaz', 1987. 88 s. (In Russ.).

Information about the authors

Anastasia A. Sokolova – Bachelor of Engineering Sciences in Space and Ground-Based Radio Engineering Systems, Engineer-technologist of JSC Central Research Institute Electron, Torez Av., 68, lit. R, Saint Petersburg, 194223, Russia.

E-mail: nanasokol@list.ru

<https://orcid.org/0009-0007-7275-9824>

Valentina D. Andreeva – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor at the Higher School of Materials Physics and Technology of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Politechnicheskaya St., 29, Saint Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: avd2007@bk.ru

Vadim V. Davydov – Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Photonics Department, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: davydov_vadim66@mail.ru

Daniil S. Provodin – Master of Engineering Sciences in Laser and Fiber Optic Systems, postgraduate students in Condensed Matter Physics of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Politechnicheskaya St., 29, Saint Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: provodindanya@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-7007-9215>

Artem E. Kim – Master of Engineering Sciences in Composite and Nanomaterial Technologies, engineer of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Politechnicheskaya St., 29, Saint Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: artem_7.kim@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2276-1359>

Author contribution statement:

Sokolova A. A. – collection of data on the white spot defect; processing of experimental data; analysis of the obtained results; writing the original text; final conclusions.

Andreeva V. D. – interpretation of data obtained using an X-ray diffractometer; calculation of microdeformations by the Scherrer method; analysis of the experimental data; writing the original text.

Davydov V. V. – processing of experimental data; final conclusions.

Provodin D. S. – monitoring the diffraction pattern of the diode matrix using a microscope.

Kim A. E. – conducting measurements on an X-ray diffractometer.

Статья поступила в редакцию 18.07.2025; принята к публикации после рецензирования 16.10.2025; опубликована онлайн 30.12.2025.

Submitted 18.07.2025; accepted 16.10.2025; published online 30.12.2025.
