

УДК 537.87

## ДЕГРАДАЦИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА БАЗЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

А. С. Ерофеев, И. А. Шишкин, Н. В. Латухина

В данной работе производился сравнительный анализ работы солнечных элементов, основанных на пористом кремнии, по вольт-амперным характеристикам (ВАХ) и падению отдаваемой мощности. Для расчетов использовались телеметрические данные, получаемые с МКА «АИСТ-2Д» в период с июля 2016 года по март 2019. Приведены графики ВАХ 14 элементов, показан постепенный процесс деградации в естественных условиях космоса. Элементы изготовлены по различным технологическим маршрутам, с различной обработкой рабочей поверхности (полированная, текстурированная, карбидизированная), с двумя видами просветляющих покрытий: ZnS и DyF<sub>3</sub>. По итогу эксперимента, лучше всего себя показала полированная поверхность и DyF<sub>3</sub>, пористый слой значительно увеличивает срок службы солнечного элемента.

**Ключевые слова:** солнечные элементы, радиационная стойкость, пористый кремний, ВАХ, отдаваемая мощность, АИСТ-2Д.

Характеристики фотоэлементов новой конструкции необходимы для понимания влияния воздействующих факторов космического пространства. Радиационная стойкость является принципиальным свойством наноструктурированных материалов. Под данным термином обычно понимают неизменность параметров материала или прибора при облучении определенным ионизирующим излучением. Препятствием для структурных нарушений в материале являются следующие факторы, а именно нанобъекты, которые медленно накапливают вводимые дефекты. Этим характеризуются нанопористые материалы. Так специалистами Самарского университета была выдвинута идея о применения пористого кремния в состав солнечных элементов как материала, устойчивого к механическим и климатическим воздействиям на этапе выведения и орбитального полёта малого космического аппарата АИСТ-2Д. Для проведения исследования было изготовлено 14 шт. экспериментальных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) с различными покрытиями на рабочей поверхности и различной структурой. Все образцы солнечных элементов были изготовлены в процессе

технологического цикла, который проходят кремниевые ФЭП традиционной конструкции. Основные операции цикла, кроме операций наноструктурирования, карбидизации и нанесения просветляющих покрытий, а именно ZnS и DyF<sub>3</sub>, проводились на стандартном технологическом оборудовании. Для измерения температуры фотоэлементов были использованы датчики pt100 (100 Ом) – DIN EN 60751, установленные непосредственно под панелью с исследуемыми ФЭП.

### Условия и методы исследования

С 2016 года ведётся анализ данных телеметрии, полученных с МКА «Аиста-2Д». Для ознакомления с образцами, которые были установлены на экспериментальную модель (рис. 1), ниже представлена табл. 1.

Данные приходили раз в несколько месяцев, в каждый пакет входили измерения с периодом 5 или 10 мин. При проведении расчётов выбирались значения при схожих условиях: время суток (освещённость), температура панели. В процессе работы была разработана программа для подсчёта параметров деградации (fil factor, мощность, КПД,  $U_{xx}$ ,  $I_{кз}$  и др.).

© Ерофеев А. С., Шишкин И. А., Латухина Н. В., 2020.

Ерофеев Алексей Сергеевич (A.Yerofyeyev@mail.ru),  
студент III курса;

Шишкин Иван Александрович (shishkinivan9@gmail.com),  
магистрант физического факультета;

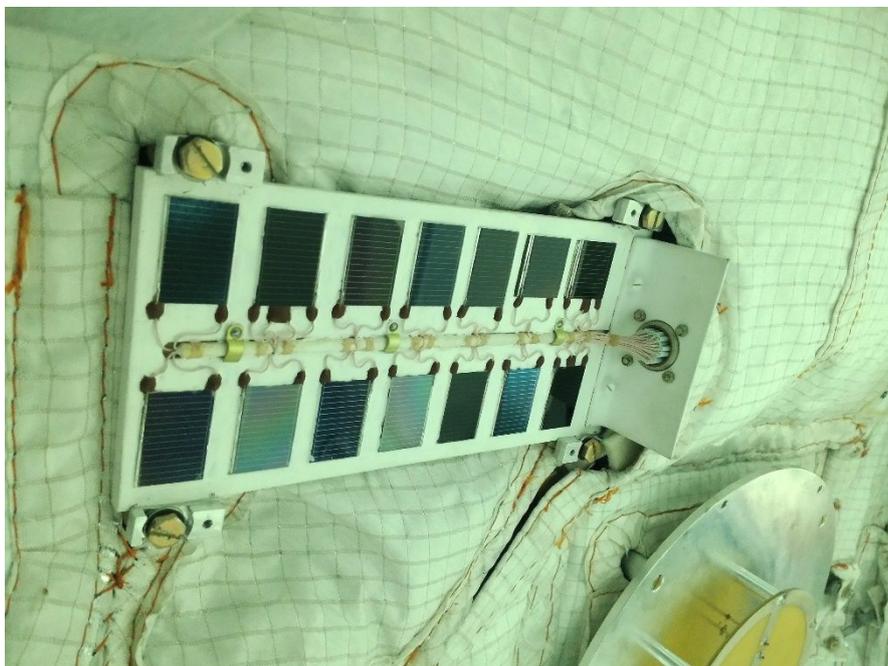
Латухина Наталья Виленовна (natalat@yandex.ru),

доцент кафедры физики твёрдого тела и неравновесных систем Самарского университета,  
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34.

Таблица 1

**Описание солнечных элементов, вошедших в состав экспериментальной панели,  
установленной на МКА «АИСТ-2Д»**

<b>Номер на ЭБФ</b>	<b>Описание</b>
1	<i>Полированный кремний с пористым слоем, просветляющее покрытие – ZnS</i>
2	<i>Полированный кремний с пористым слоем, просветляющее покрытие – DyF<sub>3</sub></i>
3	<i>Полированный кремний, просветляющее покрытие – ZnS (типовая технология)</i>
4	<i>Полированный кремний, просветляющее покрытие – DyF<sub>3</sub> (типовая технология)</i>
5	<i>Текстурированный кремний с пористым слоем, просветляющее покрытие – ZnS</i>
6	<i>Полированный кремний с пористым слоем, просветляющее покрытие – ZnS</i>
7	<i>Текстурированный кремний, просветляющее покрытие – ZnS</i>
8	<i>Текстурированный кремний с пористым слоем, просветляющее покрытие – ZnS</i>
9	<i>Шлифованный кремний с пористым слоем, просветляющее покрытие – ZnS</i>
10	<i>Полированный кремний с пористым слоем, двухслойное просветляющее покрытие – ZnS + DyF<sub>3</sub></i>
11	<i>Шлифованный кремний, просветляющее покрытие – ZnS</i>
12	<i>Шлифованный кремний с пористым слоем, просветляющее покрытие – ZnS</i>
13	<i>Карбидизированный кремний с пористым слоем, просветляющее покрытие – ZnS</i>
14	<i>Карбидизированный кремний с пористым слоем, просветляющее покрытие – DyF<sub>3</sub></i>



**Рис. 1. Вид экспериментального образца БФ на МКА «АИСТ-2Д»**

### **Результаты и их обсуждение**

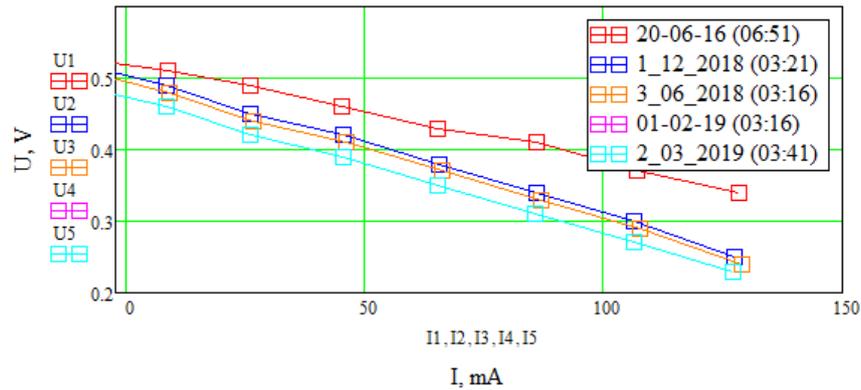
По командам, выдаваемым с наземного комплекса управления, с каждой пластины во время проведения эксперимента были

определены телеметрические данные: температура, напряжение нагрузки и сила тока. По данным построены вольт-амперные характеристики каждой из 14-ти экспериментальных

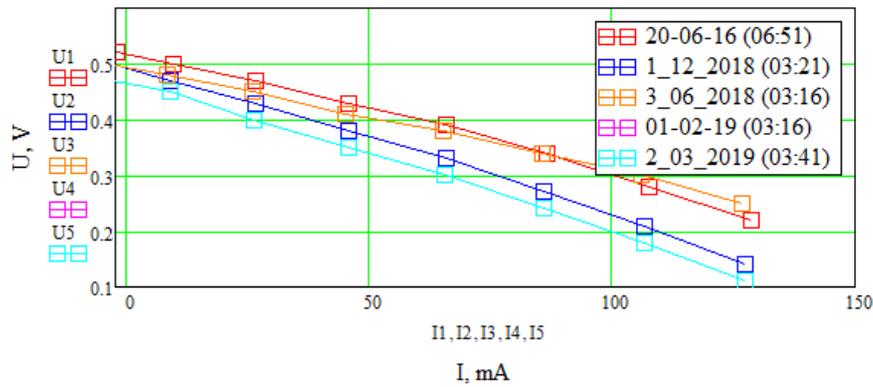
пластин для различных температур и рассчитаны их фотоэлектрические параметры. Проведённые исследования показали, что использование разработанных методик изготовления многослойных структур с пористым слоем позволяет создать фоточувствительные структуры с достаточно высокими фотоэлектрическими параметрами.

Так по результатам исследований были выбраны элементы с наилучшими эксплуатационными характеристиками. Фотоэлектри-

ческие преобразователи с пористым слоем, в которых используются соединения редкоземельных элементов показали высокую устойчивость в условиях открытого космоса. Для сравнения были выбраны элементы с использованием полупроводникового соединения сульфида цинка, где разница состояла в том, что в одном случае использовался пористый слой, а в другом нет. Ниже представлены графики вольт-амперных (рис. 2) и вольт-ваттных (рис. 3) характеристик.

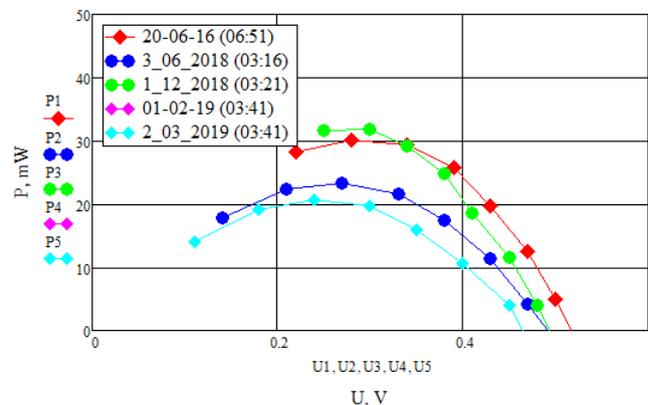
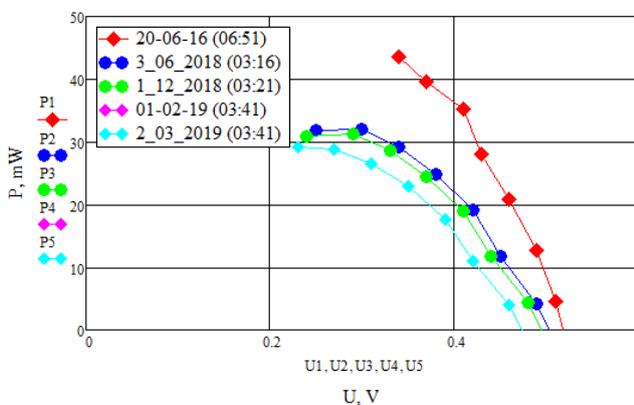


**A**

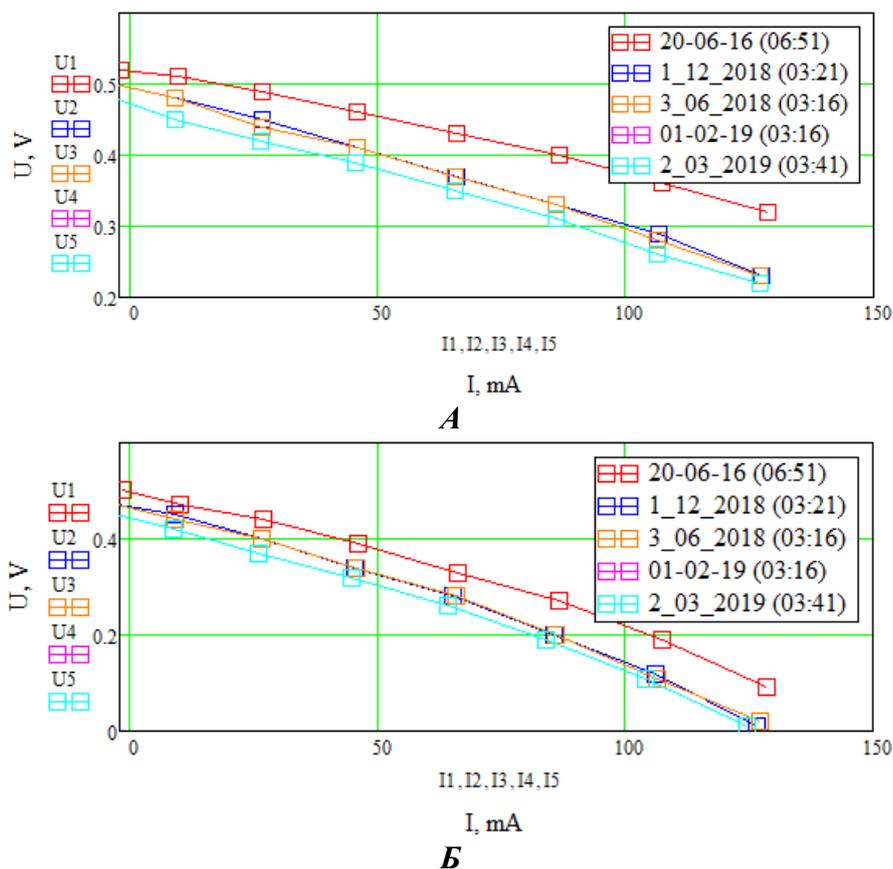


**B**

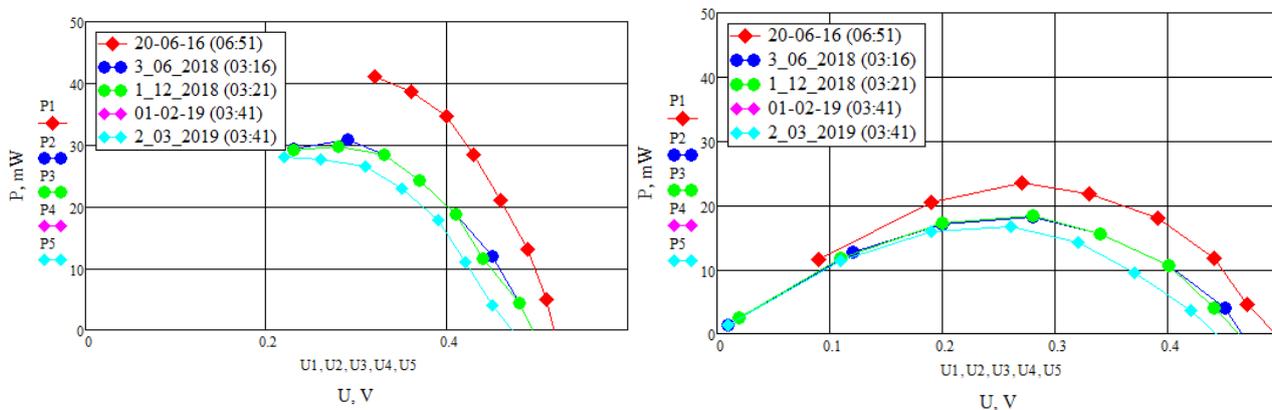
**Рис. 2. Вольт-амперные характеристики фотоэлектрических преобразователей: А – № 1, Б – № 3**



**Рис. 3. Вольт-ваттные характеристики фотоэлектрических преобразователей № 1 (слева) и № 3 (справа)**



**Рис. 4. Вольт-амперные характеристики фотоэлектрических преобразователей: А – № 2, Б – № 4**



**Рис. 5. Вольт-ваттные характеристики фотоэлектрических преобразователей № 2 (слева) и № 4 (справа)**

Исследования показали, что для устойчивости солнечных элементов в экстремальных условиях мало нанесения просветляющего покрытия, также необходимо получение пористого слоя. Поскольку при электрохимическом травления полированная подложка приобретает эффект «чёрного кремния», что тем самым увеличивает площадь поглощения света, но и также сохраняет устойчивость при радиационном излучении. Это подтверждается данными, полученными с наземного центра управления.

Анализ характеристик образцов, которые выполнены с использованием диэлектрического материала фторида диспрозия (ФЭП № 2 и №4) показывает, что также характеристики зависят от наличия пористого слоя, который необходим для устойчивости характеристик (рис. 4 и 5). Можно сделать выводы, что пористый слой значительно влияет на радиационную стойкость образца, и просветляющее покрытие из  $DyF_3$  предпочтительнее, так как не имеет полупроводниковых свойств, как  $ZnS$ .

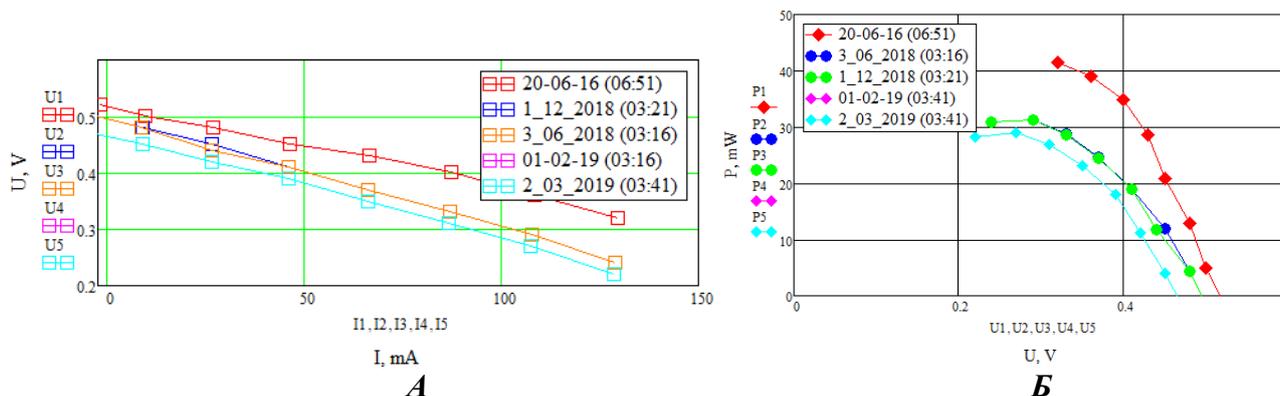


Рис. 6. Вольт-амперные (А) и вольт-ваттные (Б) характеристики фотоэлектрического преобразователя № 10

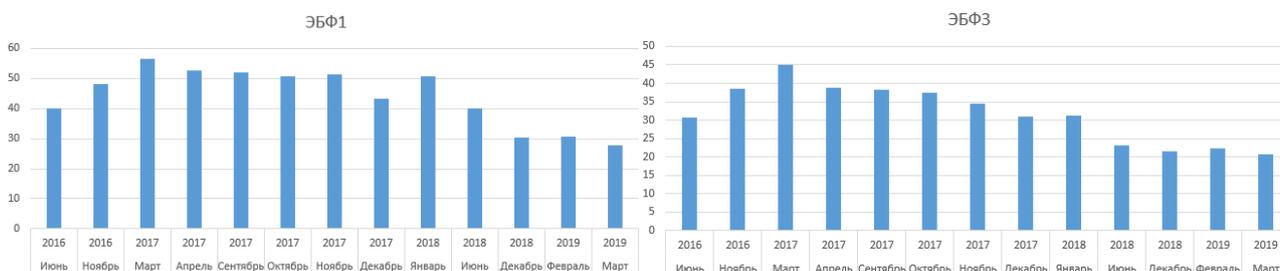


Рис. 7. Динамика мощности (в мВт) для 1 и 3 образца с 2016 по 2019 гг.

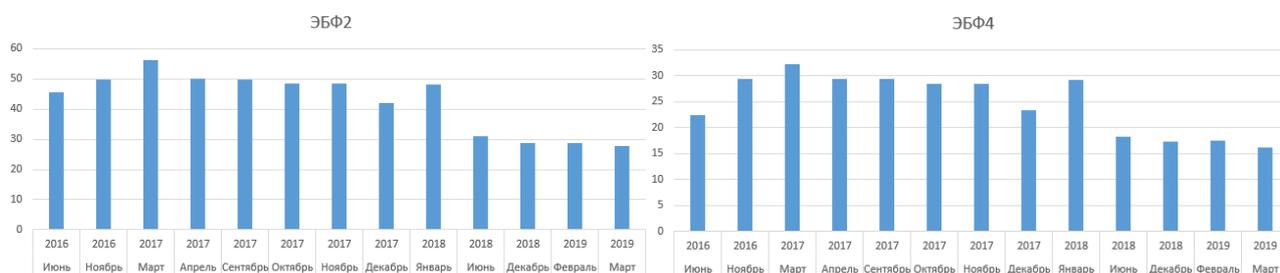


Рис. 8. Динамика мощности (в мВт) для 2 и 4 образца с 2016 по 2019 гг.

Анализ характеристик солнечного элемента с пористым слоем и двойным покрытием ( $ZnS+DyF_3$ ) (рис. 6) показывает, что на протяжении трёх лет сохраняется медленная деградация элемента порядка 5 % в год. Также были построены диаграммы показателей максимальной мощности для исследуемых образцов.

Как следует из рис. 7 и 8, в первые два года образцы № 1–4 деградируют сильнее всего. Дальше происходит постепенная потеря своих характеристик.

### Заключение

Пористый слой благодаря своей структуре мешает накоплению дефектов на поверхности кремния и этим продлевает срок службы солнечного элемента. Покрытие  $DyF_3$  показало себя лучше, чем  $ZnS$ . Полированная и текстурированная поверхность показала хорошую радиационную стойкость.

### Литература

1. Оптические свойства нитевидных наноструктур, полученных металлстимулированным химическим травлением пластин слабо легированного кристаллического кремния / К. А. Гончар, Л. А. Осминкина, В. Сиваков [и др.] // Физика и техника полупроводников. 2014. Т. 48. № 12. С. 1654–1659.
2. Ерофеев А. С. Деградация солнечных элементов на базе пористого кремния: курсовая работа ... Самара, 2020. 43 с.
3. Эксплуатационные характеристики фотоэлектрических преобразователей на базе пористого кремния, участвующих в летном эксперименте на МКА «Аист-2Д» / А. С. Гуртов, С. В. Ивков, Д. А. Лизункова [и др.] // XIV Королевские чтения: матер. Междунар. конф. Самара, 2017. Т. 1. С. 503–504.

## DEGRADATION OF SOLAR CELLS BASED ON POROUS SILICON

A. S. Erofeev, I. A. Shishkin, N. V. Latukhina

In this paper, a comparative analysis of the operation of solar cells based on porous silicon was performed by Volt-Ampere characteristics and power drop. Telemetry received from THE AIST-2D ICA in the period from July 2016 to March 2019 was used for calculations. Graphically shows the VACH 14 elements, shows the gradual process of degradation in the natural environment of space. The elements are manufactured using special technologies, including the following surfaces: polished, textured, carbided, as well as two types of anti-reflective coatings:  $ZnS$  and  $DyF_3$ . As a result of the experiment, the polished surface and  $DyF_3$  proved to be the best, the porous layer significantly increases the service life of the solar cell.

**Key words:** solar cells, radiation resistance, porous silicon, I-V characteristics, AIST-2D.

*Статья поступила в редакцию 08.07.2020 г.*

---

© Erofeev A. S., Shishkin I. A., Latukhina N. V., 2020.

Erofeev Aleksey Sergeevich (A.Yerofyeyev@mail.ru),  
student III course;

Shishkin Ivan Aleksandrovich (shishkinivan9@gmail.com),  
graduate student of the Physics Faculty;

Latukhina Natalya Vilenovna (natalat@yandex.ru),

professor of the Solid State Physics and Nonequilibrium Systems Department of the Samara University,  
443086, Russia, Samara, Moskovskoye Shosse, 34.