



Государственный научный центр Российской Федерации –
Институт физики высоких энергий
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

ИФВЭ 2014–11
ОЭФ

С.В. Ерин

Перспективы 3d-печати детекторов частиц

Протвино 2014

Аннотация

Ерин С.В. Перспективы 3d-печати детекторов частиц : Препринт ИФВЭ 2014–11. – Протвино, 2014. – 13 с., 5 рис., 1 табл., библиогр.: 7.

В работе даётся краткий обзор существующих технологий 3D печати и рассматриваются перспективы изготовления детекторов частиц с использованием этих технологий.

Abstract

Erin S.V. Prospects for 3d-printing of particle detectors : IHEP Preprint 2014–11. – Protvino, 2014. – p. 13, fig. 5, tables 1, refs.: 7.

The paper gives a brief overview of existing technologies of 3D printing, and examines the prospects for the manufacture of particle detectors using these technologies.

Введение

Мы являемся свидетелями технологической революции- 3 D печати твёрдых объектов, в основе которой лежит принцип послойного создания (выращивания) твёрдого объекта. Эта технология получила название: аддитивное производство (AM-additive manufacturing). Если до сих пор, при изготовлении твёрдого объекта мы, как говорил Роден «...отсекали всё лишнее», то данная технология, наоборот, подразумевает сборку объекта из тонких слоёв. Возможность изготавливать за короткое время 3D объекты - от деталей машин, математических поверхностей, до медицинских протезов с минимальными погрешностями и отклонениями от заданных размеров –позволяет говорить, что эта технология имеет огромные перспективы. Первые эксперименты по 3D печати стартовали с начала восьмидесятых годов прошлого столетия. Текущему распространению новой 3D технологии способствовало развитие компьютеров, информационных технологий и возможность использования патентов, утративших сроки действия (технология FDM). Кстати, в 2014 году заканчиваются сроки действия патентов для технологии SLS. Это позволит выпускать достаточно дешёвые трёхмерные (3D) принтеры с высокими точностными характеристиками, что ещё больше увеличит интерес к этой технологии в разных областях науки и производства. Одним из активнейших центров по продвижению этой технологии в области науки и образования является Международный центр теоретической физики Абдуса Салама (Триест) [1].

Изготовление прототипа детектора всегда является трудоёмким и долгим процессом. Постоянно присутствует желание упростить и ускорить этот процесс. В настоящее время, благодаря развитию такой технологии, как 3D печать появилась возможность реализовать эти желания. Целью данного обзора является рассмотрение перспектив использования возможностей 3D печати для изготовления детекторов ионизирующих частиц, частей и оснастки, используемой для их изготовления.

Что такое 3D-печать.

Прежде всего, дадим определение, что такое 3D-печать. 3D-печать — это преобразование 3-мерного цифрового графического изображения в реальный объект методом печати на 3D принтере. Объемное изделие получается послойным нанесением материалов, перечень которых непрерывно растёт. Например, используются такие материалы, как: различные полимеры, пластмассы, металл, гипс, бетон, акрил и др.

Рассмотрим этапы создания 3D объекта.

На первом этапе создаётся цифровая объёмная модель. Причём есть два способа создания модели:

1. С использованием 3D-сканера.
2. Моделирование на компьютере с использованием CAD.

Профессиональный 3D-сканер является дорогостоящим оборудованием и поэтому его использование ограничено. Наиболее широкое распространение получило создание модели с помощью компьютера. В этом случае создается прототип модели конструктором на компьютере с применением специальной программы. Преимущество компьютерной цифровой модели состоит в том, что созданный макет до отправки на печать можно подкорректировать и увидеть в объеме на экране монитора. Существует достаточно большое количество программ CAD, как свободных, так и коммерческих, с помощью которых можно создать цифровую модель объекта. Требование к этим программам одно - возможность создания конечного файла в форматах : **STL, SLC, VRML, PLY, 3DS, ZPR**. Наиболее часто используемые коммерческие программы: **Solid Works, Solid Edge, AutoCad** и др.. Существует также достаточное количество бесплатных программ, например:

SketchUp -простая в использовании, оптимизирована для создания простых архитектурных моделей

FreeCAD - работает под ОС Win/Mac/Linux. Позволяет создавать 2D-и 3D-параметрические модели.

Blender Наиболее известная программа с открытым исходным кодом. Работает под ОС Win/Mac/Linux.

Autodesk™ Inventor Fusion - профессиональное CAD приложение под Win/Mac, бесплатное для некоммерческого использования.

Очень интересным является язык программирования **OpenSCAD** для создания 3D-моделей с помощью алгоритмов. Это очень мощный и многофункциональный язык, с помощью которого удобно создавать технические модели.

Второй этап – экспортирование модели и восстановление полигональной сетки ("mesh repairing"). На этом этапе создают файл, который содержит всю геометрическую информацию, необходимую для отображения цифровой модели. Почти всегда цифровая модель содержит дефекты, которые возникают при создании. Такие дефекты, исправляют при помощи специальных программ, с помощью которых можно анализировать объектную сетку и манипулировать ей (например уменьшить её сложность и число элементов). Довольно часто используются такие программы, как: **netfabb Studio Basic, MeshLab**.

Третий этап – преобразование цифровой модели в список команд 3D-принтера. Его ещё называют этапом нарезки или "slicing". Информация в STL-файле содержит только список координат $\langle X, Y, Z \rangle$ вершин треугольных ячеек, составляющих множество многоугольных поверхностей сетки объекта, а принтеру нужна очень разная информация. Необходимо указать путь движения печатающей головки и/или платформы в различных направлениях X, Y и Z, количество используемого материала, точное время, необходимое для начала и конца выдавливания материала, температуру сопла и печатной платформы, высоту слоя, усадку материала, расположение на платформе и так далее. Этот список команд обычно называется G-код. Такое “преобразование” из координат вершин в команды печати является трудоёмкой вычислительной задачей и должно быть сделано заранее на внешнем компьютере. В итоге 3D-модель "нарезается" на множество горизонтальных слоев, каждый из которых обрабатывается отдельно для расчёта оптимальных путей сопла или лазерного луча принтера. Существует достаточное количество бесплатных программ (их ещё называют - слайсеры), которые преобразуют цифровую модель в список команд 3D-принтера. но надо отметить, что эти программы ориентированы на определённые типы принтеров. Например: слайсер **Slic3r** является открытой программой, используемой для нарезки, и поддерживается широким кругом производителей принтеров.

Четвёртый этап – загрузка инструкций в принтер.

Пятый этап – печать на 3D-принтере

Шестой этап – удаление вспомогательных частей (поддерживающие опоры, подложку – если они есть) у созданного объекта, конечная обработка поверхности.

Существующие технологии.

Кратко рассмотрим технологии, которые используют для создания слоев при 3D-печати.

- **Лазерная:**

1. Лазерная стереолитография (SLA) — объект формируется из специального жидкого фотополимера, который затвердевает под действием лазерного излучения (или излучения ртутных ламп). Лазерное излучение формирует на поверхности текущий слой разрабатываемого объекта, при этом жидкий полимер затвердевает и превращается в достаточно прочный пластик. После чего, объект погружается в фотополимер на толщину одного слоя, чтобы лазер мог приступить к формированию следующего слоя.

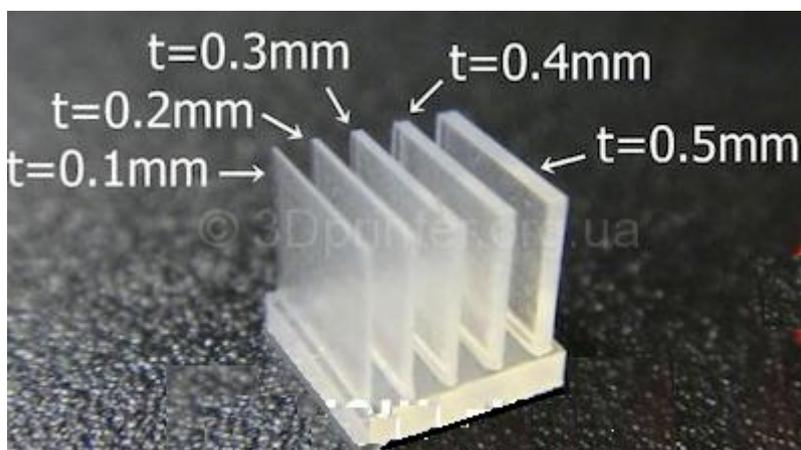


Рис. 1. Пример возможностей SLA печати [3].

2. Селективное лазерное спекание (selective laser sintering, SLS, Direct metal laser sintering — DMLS) — объект формируется из плавкого порошкового материала (пластик, металл) путем его послойно спекания с помощью луча лазера. Процесс DMLS отличается

от SLS тем, что спекается лазером чистый порошок, без полимерного связующего. Порошок в рабочей камере разогревается до температуры, близкой к плавлению, разравнивается, и лучом лазера на нём прорисовывается необходимый контур. В месте контакта луча и порошка частицы плавятся и спекаются друг с другом и с предыдущим слоем (отсюда и название метода). Затем платформа опускается на толщину одного слоя, в камеру насыпается новый слой порошка, разравнивается, и процесс повторяется. В результате получается готовая модель с пористой шероховатой поверхностью.

Список используемых материалов довольно широк: литейный воск, термопластичные полимеры, стекло, керамика, металл (в виде частиц, покрытых полимером). Модели, изготовленные по этой технологии, получаются самыми прочными среди 3D-напечатанных. Металлические изделия после изъятия из рабочей камеры доводят в специальной печи, где выжигают пластик, а поры заполняются легкоплавкой бронзой. Порошки на основе керамики или стекла позволяют изготавливать также модели, обладающие высокой химической и термической стойкостью. Недостатком SLS принтеров является большое время подготовки к работе, требуемое для нагревания порошка и стабилизации температуры, полученные модели имеют довольно пористую и шероховатую структуру, необходима полноценная чистка всей камеры после изменения.

Разрешение печати меньше, чем при использовании SLA (минимальная толщина слоя — 0,1-0,15 мм), зато скорость в несколько раз выше (до 35 мм/час).

DMLS - технология позволяет печатать особо сложные и высокоточные прототипы, шаг точности которых составляет 0.02 мм.

Преимущества DMLS технологии:

1. возможность использования различных материалов с различными физико-химическими свойствами,
2. очень высокая точность при создании сверхсложных моделей,
3. высокая скорость работы.

Недостатки метода DMLS:

1. требуется использование термической обработки,
 2. высокая стоимость работы и материалов.
- *Ламинирование* (Laminated Object Manufacturing, LOM) — деталь создаётся из большого количества слоёв рабочего материала (бумага, пластик или металлическая фольга.), которые постепенно накладываются друг на друга и склеиваются, при этом лазер вырезает в каждом контуре сечения будущей детали. Разрешение по оси Z зависит от вида используемого

материала, и определяется толщиной слоя. Общая точность печати намного уступает технологии SLA, DMLS, SLS, DMD, SLM и т.д);



Рис.2 Пример объекта, изготовленного из титана по DMLS технологии [4].

- *Электронно-лучевая плавка* — аналогична технологиям SLS/DMLS, только здесь объект формируется путем плавления металлического порошка электронным лучом в вакууме.
- *Струйное 3D-моделирование*. При этой технологии в принтере используют два вида материалов: поддерживающего (воск) и моделирующего (на основе термопластов). В процессе печати одновременно используются оба материала, с дальнейшей их фотополимеризацией. Заключительный этап — выравнивание.

Преимущества метода:

Возможность создания твердых и мягких изделий. Мягкие изделия имеют схожесть с каучуком или резиной. Высокая скорость создания модели. Низкая стоимость

- *Склеивание или спекание порошкообразного материала (binding powder by adhesives)* — похоже на лазерное спекание, только порошковая основа склеивается жидким (иногда клеящим) веществом, поступающим из струйной головки. Используя вещества различных цветов можно воспроизвести окраску детали. Набор модельных материалов весьма разнообразен: гипс, керамика, гипсо-керамика, композитные порошки, в частности, на основе целлюлозы и эластомеров, литейный песок

- *Моделирование методом наплавления* (fused deposition modeling, FDM) — объект формируется путем послойной укладки расплавленной нити из плавкого рабочего материала (пластик, металл, воск). Через экструзионную головку разогретая до плавления нить выдавливается на охлаждаемую платформу, формируя текущий слой изготавливаемого объекта. Затем платформа опускается на толщину одного слоя и наносится следующий слой. Часто в данной технологии используют две рабочие головки — одна выдавливает на платформу рабочий материал, другая — материал поддержки.
- *Биопринтеры* — печать 3D-структуры будущего объекта (органа для пересадки) производится стволовыми клетками. Далее деление, рост и модификации клеток обеспечивает окончательное формирование объекта.

3D принтеры.

В настоящее время большое число компаний выпускают широкую номенклатуру 3D принтеров, использующих ту или иную технологию : от промышленных до бытовых, в разном ценовом диапазоне. Ведущими производителями 3D принтеров являются фирмы: Stratasys, ZCorp (США), ProMetal (США), Voxeljet (Германия), EnvisionTEC (Германия), EOS (Германия), Objet Geometris, Израиль) и др. Основные параметры принтеров, которые интересны для пользователей, это: толщина слоя построения, размеры зоны построения, точность, а также используемый материал. Надо отметить, что каждый производитель разрабатывает свою линейку 3D принтеров и набор материалов, используемых для изготовления деталей. Зона построения обычно выбирается в диапазоне $30 \times 40 \times 100 \dots 700\text{мм} \times 380\text{мм} \times 560\text{мм}$, толщина слоя в зависимости от используемой технологии от 0.02мм и больше. Точность воспроизводимой модели также зависит от используемой технологии и начинается примерно от 0.02мм. Существуют биопринтеры с точностью несколько микрон, но их применение достаточно специфичное.

Что касается стоимости, то цена на 3D принтеры варьируется от нескольких миллионов рублей для профессиональных и от 30 тысяч рублей и выше для бытовых. Надо отметить, что *в настоящее время многие фирмы предоставляют услуги по 3D печати*, причём из различных материалов и по различным технологиям. Цены зависят от фирмы, от используемой технологии, материала и детали и находятся в диапазоне $15\text{руб}/\text{см}^3 - 3000\text{руб}/\text{см}^3$.

3D-печать детекторов частиц: настоящее и перспективы

Понятно, что для серийного производства детекторов 3D-печать применять пока нерационально из-за довольно высокой стоимости на расходные материалы. Наиболее оптимальным видится применение для изготовления прототипов и одиночных экземпляров детекторов. Рассмотрим уже существующие возможности 3D-печати детекторов - прежде всего, это изготовление корпусных деталей и матриц для их серийного изготовления.

Газовые детекторы.

MWPC/DC

Исходя из достигнутых точностей и набора используемых материалов, не возникает никаких сомнений в возможности изготовления деталей пропорциональных (*MWPC*) и дрейфовых камер (*DC*) (как известно, плоскостность рамок, из которых собирается камера, не должна превышать 0.05мм). Использование 3D-печати позволяет также изменить традиционную конструкцию таких камер.

Детекторы с микроструктурой (*micro-pattern*).

К таким детекторам относятся детекторы с GEM, Micromegas и т.д. Характерной особенностью этих детекторов является размер усилительных элементов, который составляет порядка нескольких десятков микрон. В статье [2] подробно рассмотрены требования к 3D-принтеру, в случае его использования для изготовления GEM.

Таблица 1.

	Current capability	Performance goal
Printing resolution in x-y	~ 75 μm	~ 1 μm
Layer thickness in z	~ 20 μm	~ 1 μm
Print speed	10 cm/s	> 100 cm/s
Materials	Either polymers or metals	Polymer-metal composites
Object size	50 cm \times 50 cm \times 25 cm	200 cm \times 100 cm \times 10 cm

Как видно из таблицы №1 [2], в настоящее время характеристики, выпускаемых принтеров не удовлетворяют необходимым требованиям. Что касается детекторов на основе THGEM, то пока ситуация пограничная. Характерные размеры для THGEM : диаметр отверстия порядка 300мкм, расстояние между отверстиями ~700мкм, толщина

~500 мкм. Немаловажным, при изготовлении подобных детекторов является способность 3D принтера к печати полимерно-металлической композицией. Конечно, можно изготовить THGEM с диаметром отверстия порядка 1мм, расстояние между отверстиями 1мм и толщиной 1 мм. Но, надо отметить, что очень важным является соосность отверстий в проводящем покрытии и полимере, влияющая на величину рабочего напряжения, которое можно подать на THGEM.

Дрейфовые трубки (Straw tubes).

Минимальная толщина стенок при 3d печати зависит от используемого материала и метода печати (принтера) от 0.1мм и выше. Но необходимо отметить, что получаемая поверхность требует дополнительной обработки, поскольку она получается пористой и шероховатой (в зависимости от используемой технологии). Так, например, для технологии SLA шероховатость может составлять 100мкм. Совсем недавно, компания *3D Systems* (www.3dsystems.com) выпустила семейство принтеров ProJet, использующих технологию печати MJM (Multi-Jet Modeling), которая позволяет получить достаточную гладкость поверхности. Наиболее очевидным выглядит изготовление торцевых элементов (endplug), если не требуется позиционирования сигнальной проволоки с точностью лучше 50мкм, а также газовой обвязки.

Камеры с гексагональной ячейкой (honeycomb chamber).

3D печать позволяет технологически просто изготавливать камеры с гексагональной ячейкой. Если использовать SLA или DLP технологию, то можно достичь толщины стенок порядка 200мкм. Стоит отметить, минимальная толщина стенок зависит не только от технологии, но и от прочностных свойств материала и печатаемой конструкции.

Сцинтилляционные детекторы.

Рассмотрим возможности применения 3D печати для изготовления сцинтилляционных детекторов. Что касается корпусных деталей для сцинтилляционных детекторов, то с помощью 3D печати можно изготавливать широкую номенклатуру таких деталей. Возникает очень интересный вопрос: **Можно ли с помощью 3D печати изготавливать сцинтилляционные материалы?**

Рассмотрим два возможных способа: использование SLS технологии и технологии склеивания порошков (Binding powder by adhesives). Одним из материалов, который используется для изготовления сцинтилляторов, является полистирол. Порошковый полистирол используют в SLS –принтерах. Как было отмечено ранее, в этой технологии тонкий слой порошкообразного рабочего материала, находящегося в соответствующей камере, переносится на рабочую платформу равномерным тонким слоем. Затем, лазерный луч, очерчивает на нанесенном слое порошка текущее сечение модели. Так как лазерный луч является источником тепла, то происходит спекание гранул полистирола, и на том месте, где проходил лазерный луч, образуется твердый полимер. Было бы интересно проверить подобный способ получения сцинтилляционной детали. В ИФВЭ был изготовлен сцинтиллятор с помощью спекания гранул полистирола в муфельной печи, который показал положительный результат [4].

Другой возможный способ изготовления сцинтиллятора с помощью модифицированной технологии склеивания порошков (Binding powder by adhesives). В этом способе слой из гранул полистирола в нужных местах проклеивается фотополимеризующимся акриловым клеем и отверждается УФ-светом

Получение сцинтиллятора с помощью 3D печати и использование WLS- волокон позволит создавать различные детекторы. Пример создания канавки для волокна в теле пластика с использованием SLA технологии приведён на рис.3

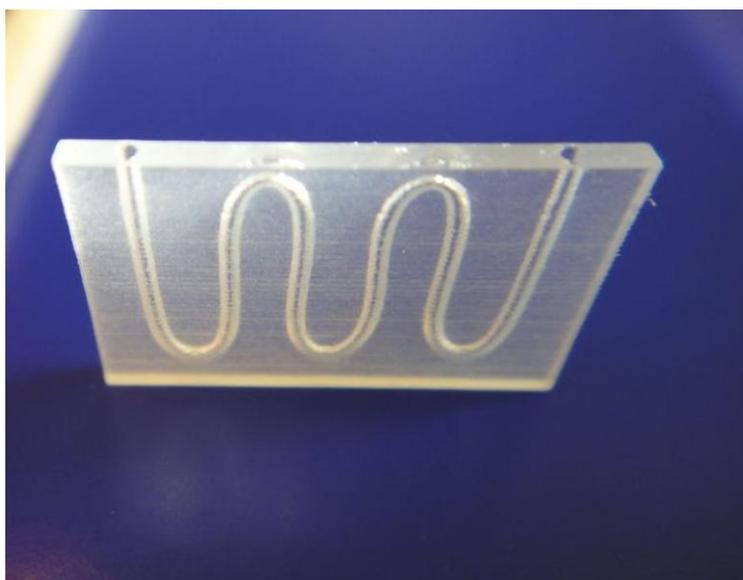


Рис.3 Пример пластика с канавкой для волокна

Использование SLA, Polyjet, MJM технологий позволяет получать также прозрачные детали на основе акриловых или поликарбонатных смол. Например, при изготовлении сцинтилляционного детектора большого размера бывает необходим адиабатический световод, либо линзы Винстона для сбора света на MAPD. Такие детали было бы логично изготавливать с помощью 3D печати.



Рис.4 Пример качества прозрачности линзы из фотополимера [6].

На рисунке 4 приведён пример линзы из фотополимера на основе акрила, изготовленной методом 3D печати. На рынке также предлагаются прозрачные материалы на основе поликарбоната. При работе с оптическими или сцинтилляционными волокнами возникает необходимость использования оптических коннекторов, которые также можно изготавливать методами 3D печати.

Изготовление деталей с помощью 3D печати пока процесс недешёвый, а что делать, когда необходима мелкая серия?

Наиболее дешёвым способом является литьё в пресс-формы, при этом используется литьё в силиконовую форму под вакуумом или так называемая RIM (Reaction Injection Molding) технология - заливка полиуретанов в форму под низким давлением. Для изготовления силиконовой и полиуретановых форм необходима мастер модель. *Печать мастер модели на 3D принтере позволяет значительно сократить время из-*

готовления пресс-формы и обойдется значительно дешевле. Что важно, внесение изменений в конструкцию пресс-форм можно сделать очень быстро и с малыми затратами. Стоит отметить, что самыми популярными на сегодня являются силиконовые формы для литья. Такая популярность обусловлена невысокой стоимостью и минимальными временными затратами на изготовление.

3D печать электронных плат.

Заманчивым выглядит изготовление с помощью 3D печати не только самого детектора, но и электронных печатных плат для вывода электрических сигналов с детектора. В настоящее время, делаются определённые шаги для решения этой задачи. Так выпущен 3D принтер [7], который позволяет печатать электронные платы. Пример такой платы можно видеть на рис.5.

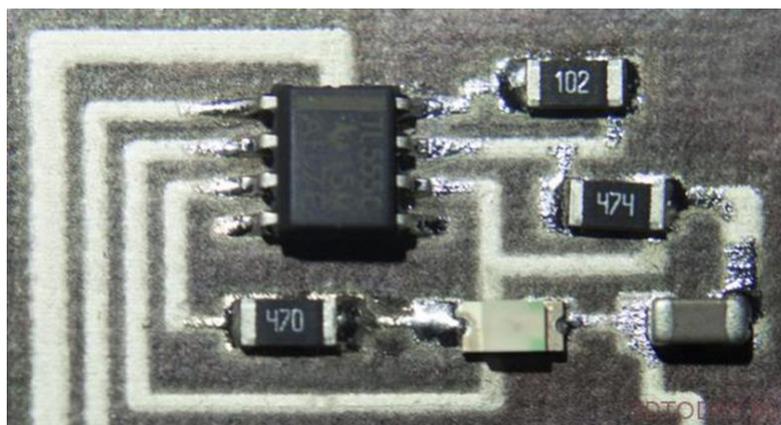


Рис.5. Пример электронной платы, напечатанной на принтере Argentum [7]

Заключение.

3D печать обладает огромными потенциальными возможностями, которые всё больше реализуются в настоящее время. Использование этих возможностей позволит не только изменить механическую конструкцию детекторов, но и создавать новые чувствительные элементы, интегрируя их с регистрирующей электроникой. Уже при нынешнем развитии технологий 3D печати возможно изготовление, как определённых детекторов, так и их частей. Есть две возможности изготовления:

1. Заказ на специализированной фирме. Существует достаточно много фирм, которые имеют профессиональные 3D принтеры и специализируются на выполнении сторонних заказов.
2. Создание своего участка прототипирования и изготовление детекторов на этом участке.

Для ИФВЭ видится разумным оба варианта.

Список литературы

- [1] Low-cost 3D Printing for Science, Education & Sustainable Development
Editors: E. Canessa, C. Fonda, M. Zennaro. ICTP , 2013
<http://sdu.ictp.it/3D/index.html>.
- [2] M. Hohlmann *Dept. of Physics and Space Sciences, Florida Institute of Technology, Melbourne, FL 32901 September 3, 2013*
- [3] <http://3dprinter.org.ua>
- [4] <http://prototype.asia/3dprinting/sls/>
- [5] Частное сообщение А.М. Горин (ИФВЭ)
- [6] <http://www.stratasys.com/materials/polyjet/>
- [7] <http://www.cartesianco.com/store/>

Рукопись поступила 27 октября 2014 г.

Ерин С.В.

Перспективы 3d-печати детекторов частиц.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного автором.

Подписано к печати 29.10.2014. Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.

Печ.л. 1,12. Уч.– изд.л. 1,44. Тираж 80. Заказ 14. Индекс 3649.

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт»

142281, Московская область, город Протвино, площадь Науки, дом 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

П Р Е П Р И Н Т 2014-11,
ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт», 2014
