

ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСИМЕРНЫХ ЛАЗЕРОВ В ПРОМЫШЛЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ВТСП-2

А. В. Пелли, Н. В. Сигитова

АО «НИИЭФА»

Первые эксперименты и исследования методов лазерного напыления начались в конце 60-х годов, вскоре после создания первого лазера. Но широкое применение метода началось лишь в конце 80-х годов, как способ быстрого эпитаксиального нанесения высокотемпературных сверхпроводящих пленок. Сам процесс напыления происходит в несколько этапов: формирование на поверхности мишени пятна лазерного излучения заданной формы, образование плазменного факела и вакуумного осаждения из паровой фазы. Для осаждения и формирования структуры сверхпроводящих материалов на основе оксидов редкоземельных металлов, помимо правильного переноса стехиометрии, требовалось также наличие окислительной среды при испарении для осуществления роста пленок. Такая задача могла быть выполнена с помощью импульсного лазерного осаждения. Из основных преимуществ такого метода нанесения можно выделить следующие: высокая производительность и скорость роста пленок, возможность напыления покрытий сложного состава с сохранением стехиометрии мишени, а также возможность напыления в условиях низкого вакуума или в заданной газовой атмосфере. Характерной особенностью метода является наличие порогового значения плотности мощности на поверхности мишени, ниже которого не наблюдается абляция. Также стоит отметить, что при слишком высоких значениях плотности мощности, большая часть энергии лазера тратится на подогрев плазменного факела, а не на нагрев мишени. Качество наносимой пленки в таком случае зависит от множества факторов: от чистоты и плотности материала мишени, атмосферы, в которой производится напыление, длины волны излучения лазера, плотности мощности лазерного излучения на поверхности мишени, длительности импульса, геометрии установки напыления, структуры и температуры подложки.

В АО «НИИЭФА» был создан технологический комплекс лазерного напыления (см. рис. 1), предназначенный для нанесения сверхпроводящих пленок и буферных слоев, необходимых для производства высокотемпературных сверхпроводников второго поколения (далее ВТСП-2).



Рис. 1. Общий вид технологического комплекса лазерного напыления

В данном комплексе используется промышленный эксимерный XeCl-лазер LAMBDA SX 200С. Такой лазер удовлетворяет всем требованиям PLD-технологии. Одним из главных преимуществ которого является возможность работы в режиме стабилизации генерируемой энергии пучка. Длина волны излучения такого лазера составляет 308 нм, что является оптимальным для нанесения сверхпроводящих пленок, а также позволяет использовать дешёвую кварцевую проходную оптику и практически не поглощается при транспортировке в атмосфере. Высокий ресурс работы (до $40 \cdot 10^6$ импульсов на одной заправке газовой смеси) позволяет использовать такой лазер при производстве длинномерных ВТСП-2 лент.

Напыление производится в технологической камере (рис. 2а), где расположены устройства для установки и перемещения мишеней (рис. 2б), держатель ленты-подложки (в виде трубы, на которую производится намотка), нагревательный элемент, поддерживающий заданную температуру в зоне напыления и тепловой экран, вращающийся вокруг нагревателя с окном для напыления, обеспечивающий низкие тепловые потери и защиту мишени от перегрева.

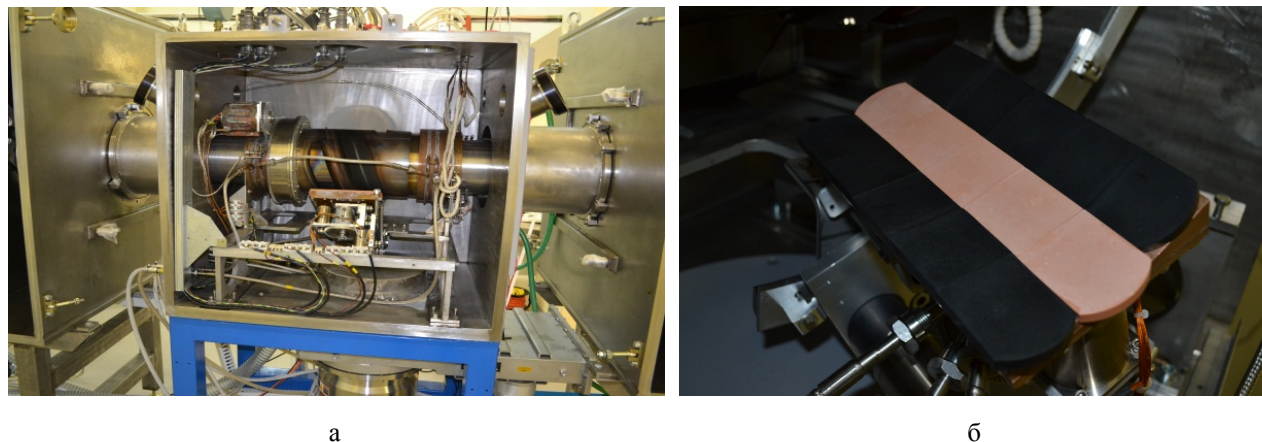


Рис. 2. Технологическая камера: общий вид (а), блок позиционирования мишеней (б)

Ввод излучения в вакуумную камеру, формирование требуемого пятна излучения на поверхности мишени и сканирование обеспечивает оптическая система транспортировки. Система состоит из двух опто-механических портов и светопровода, схематично показанных на рис. 3.

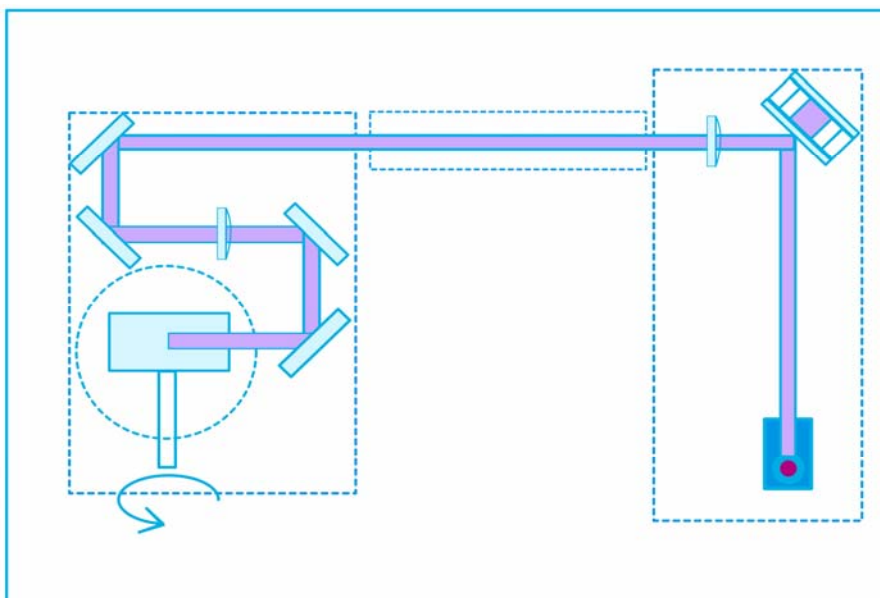


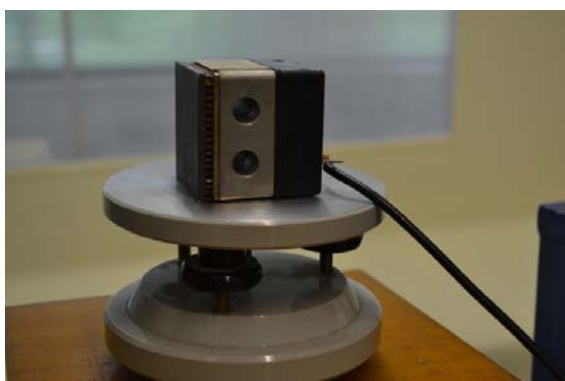
Рис. 3. Система транспортировки лазерного излучения

Лазерный порт представляет собой жесткую механическую конструкцию, расположенную на лазере. На юстировочных узлах порта закреплены: гомогенизатор, обеспечивающий создание равномерной плотности мощности по сечению лазерного луча; поворотное зеркало; вспомогательная подфокусирующая линза, обеспечивающая снижение потерь излучения. Порт технологический представляет собой жесткую механическую конструкцию, пристыкованную к вакуумной камере. На юстировочных устройствах порта последовательно по ходу излучения закреплены: поворотное зеркало, фокусирующая линза, группа поворотных разделительных зеркал и сканирующее зеркало, обеспечивающее строчную развертку фокусируемого лазерного излучения по поверхности мишени.

Величина плотности энергии лазерного излучения на поверхности мишени является одним из главных параметров при нанесении покрытий. В связи с этим большое внимание уделяется контролю стабильности излучения, генерируемого лазером. Такой процесс состоит из нескольких этапов. Первоначально осуществляется калибровка внутреннего проходного измерителя мощности лазера внешним измерителем мощности/энергии излучения: показания снимаются непосредственно в зоне выходной апертуры лазера (рис. 4а). Сравниваются показания внутренних и внешних датчиков и, при существенных отклонениях, производится калибровка. Следующим этапом является измерение плотности мощности уже непосредственно на мишени. Для проведения подобных измерений необходимо знать потери излучения при транспортировке. На лазере задается произвольная энергетика пучка, калориметрическая головка устанавливается на месте блока позиционирования мишеней (см. рис. 4в) и далее, с помощью программного обеспечения, подается серия лазерных пусков с разным количеством импульсов и разной частоты. Поглощенная за серию мощность отображается на осциллографе (рис. 4г). Таким образом можно оценить потери на прохождение оптической схемы излучением. Далее устанавливаются мишени, на поверхности формируются несколько «отпечатков» излучения и производится замер площади пятен. При равномерном распределении интенсивности можно оценить площадь пятна и плотность мощности излучения.



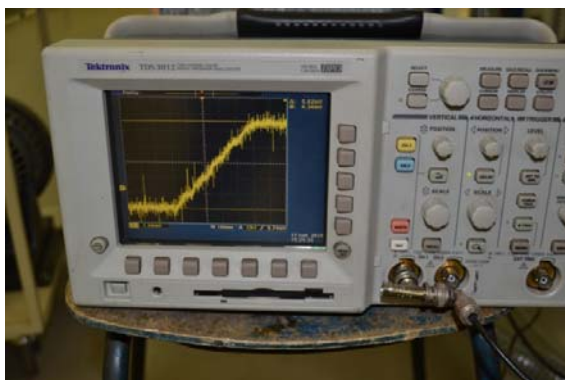
а



б



в



г

Рис. 4 Контроль и измерение излучения лазера: калибровка проходного измерителя мощности лазера с помощью Ophir FL 400A BB50 (а), настройка калориметрической головки ИП-50 (б), определение плотности энергии излучения на мишени (в, г)

Непосредственно сам процесс напыления осуществляется в результате сканирования пятна лазерного излучения по поверхности мишени. Развертку на мишени обеспечивает сканирующее зеркало, перемещение которого синхронизовано с вращением теплового экрана. Синхронизация осуществляется таким образом, что плазменный факел находится напротив окна напыления (см. рис. 5б). Перед процессом напыления необходимо подготовить поверхность мишени. Время подготовки поверхности зависит напрямую от качества поверхности и степени ее загрязненности. В момент чистки (рис. 5а) производится рассогласованное перемещение зеркала относительно теплового экрана – плазменный факел уводится в сторону от окна напыления, вследствие чего осаждаемый материал не попадает на поверхность подложки.

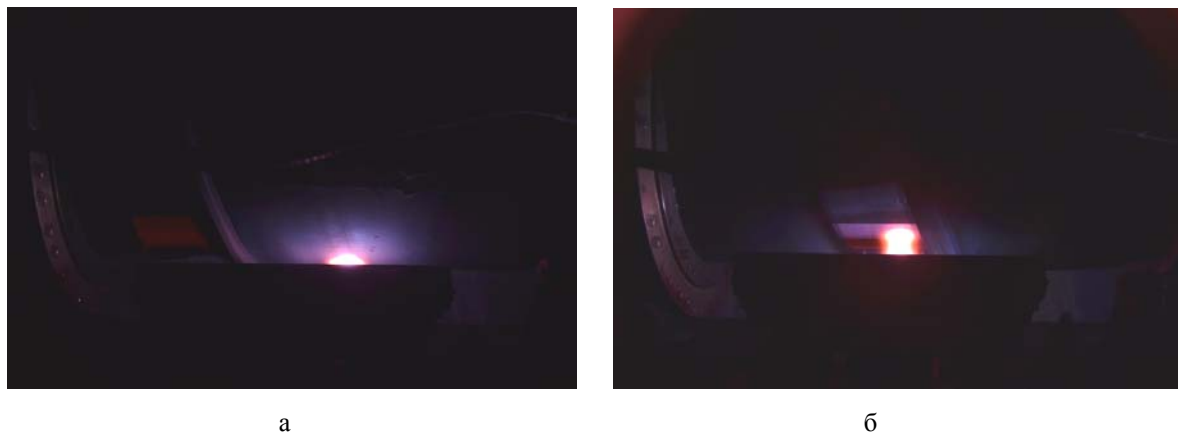


Рис. 5. Процесс а – чистки мишени лазерным излучением (рассогласованный режим), б – нанесения сверхпроводящего слоя (режим синхронизации: факел перемещается синхронно с окном напыления)

Качество получаемых покрытий, при напылении длинномерных образцов, напрямую зависит от состояния поверхности мишеней. На это, в первую очередь, влияет равномерность распределения плотности энергии в пятне и равномерность перемещения пятна по поверхности мишени. Система синхронизации обеспечивает качественную развертку, что продемонстрировано на рис. 6.

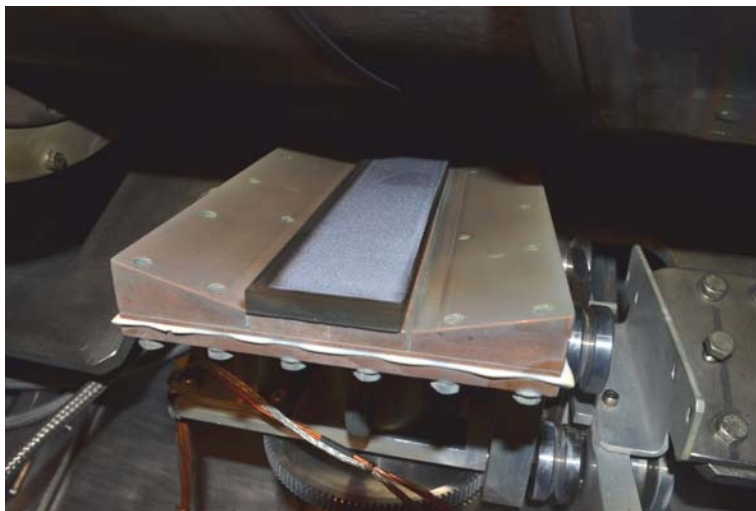


Рис. 6. Вид мишени после $2 \cdot 10^7$ импульсов

Созданный технологический комплекс лазерного напыления позволяет наносить функциональные слои на ленты длиной до 1 км за 40 часов. Технологические параметры лазера обеспечивают его работу в течение заданного времени без дополнительного напуска газовой смеси. Разработанная система управления позволяет контролировать процесс нанесения функциональных слоев одним оператором. Комплекс оснащен системами аварийного предупреждения и выключения.