

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРЕЛОМЛЯЮЩЕЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ОПТИКИ В ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ 8-100 КЭВ

¹Балтийский федеральный университет имени Канта.

Калининград, Российская Федерация. dserebrennikov@innopark.kantiana.ru

²Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н.Севченко» Белорусского государственного университета.

Минск, Республика Беларусь. dudchik@bsu.by

Проведен анализ перспективных материалов для преломляющей рентгеновской оптики в расширенном диапазоне энергий 8-100 кэВ. Проведено сравнение с широко используемыми материалами. Рассматриваются аспекты связанные как с атомными свойствами, так и с внутренней структурой материала.

Среди оптических элементов, направленных на фокусировку рентгеновского излучения, Составные Преломляющие Рентгеновские Линзы (СПРЛ) являются наиболее перспективными в силу своей относительной простоты. Первая демонстрация фокусировки рентгеновского излучения с помощью СПРЛ, изготовленной путем высверливания цилиндрических отверстий в алюминии, была произведена в 1996 [1] и дала толчок к дальнейшему развитию преломляющей рентгеновской оптики. В частности, особое внимание отведено изучению материалов для изготовления СПРЛ [2]. На сегодняшний день наибольшее применение нашли линзы из бериллия, алмаза, алюминия, кремния, никеля и некоторых полимеров (некоторые примеры СПРЛ приведены на рис. 1).

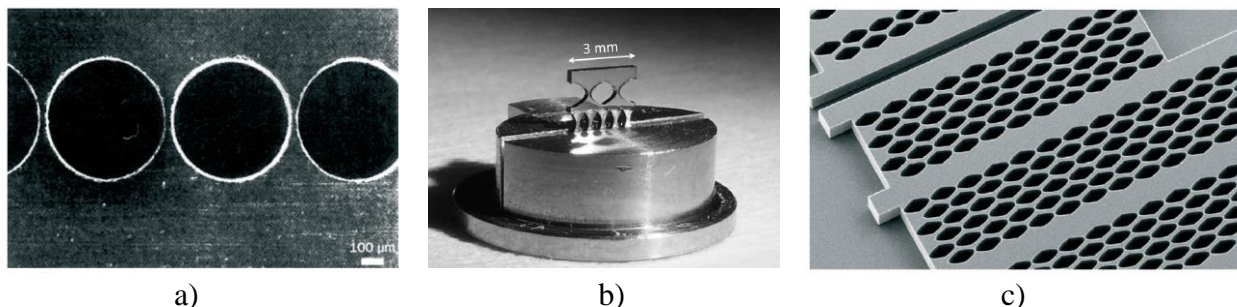


Рисунок 1 – Примеры СПРЛ, изготовленные из (а) алюминия [1], (b) алмаза [3], (c) кремния [4].

Использование бериллиевых линз вместо алюминиевых позволило на порядок увеличить потоки излучения на источниках синхротронного излучения на энергиях менее 30 кэВ. Тем не менее, бериллий имеет ряд недостатков, таких как токсичность, деградация (окисление), также имеются трудности с обработкой поверхности материала. Кроме того, бериллий обладает низкой преломляющей способностью, ввиду чего СПРЛ вынуждена состоять из большого числа единичных элементов (рис. 2).

Очевидно, что увеличение числа единичных элементов увеличивает также и вероятность aberrаций, причинами которых могут быть неидеальная форма линз, смещение/наклон линз и т.д. Сокращение числа единичных элементов выгодно в том числе с точки зрения компактности рентгеновских трансфокаторов, которые в настоящее время активно внедряются на источники рентгеновского излучения. Поскольку декремент показателя преломления, отвечающий за преломляющую способность материала, включает в себе плотность материала, то одним из возможных способов сократить число единичных элементов в СПРЛ является использование более плотных кристаллических модификаций. В качестве примера на рис. 3 приведено сравнение двух модификаций нитрида бора: гексагональной и кубической.

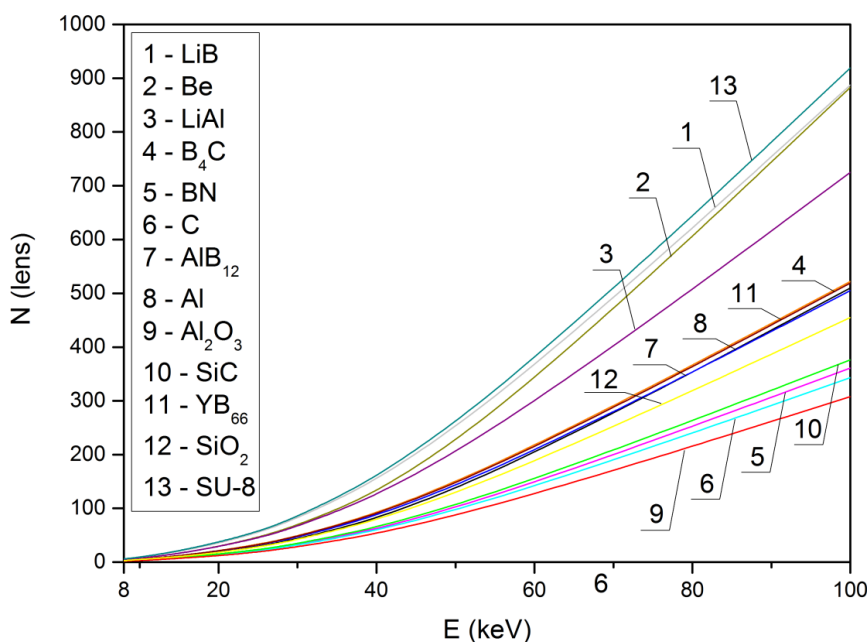


Рисунок 2 – Число требуемых линз для достижения фокусного расстояния 1 м. При расчетах радиус кривизн линзы принимался равным 0.05 мм.

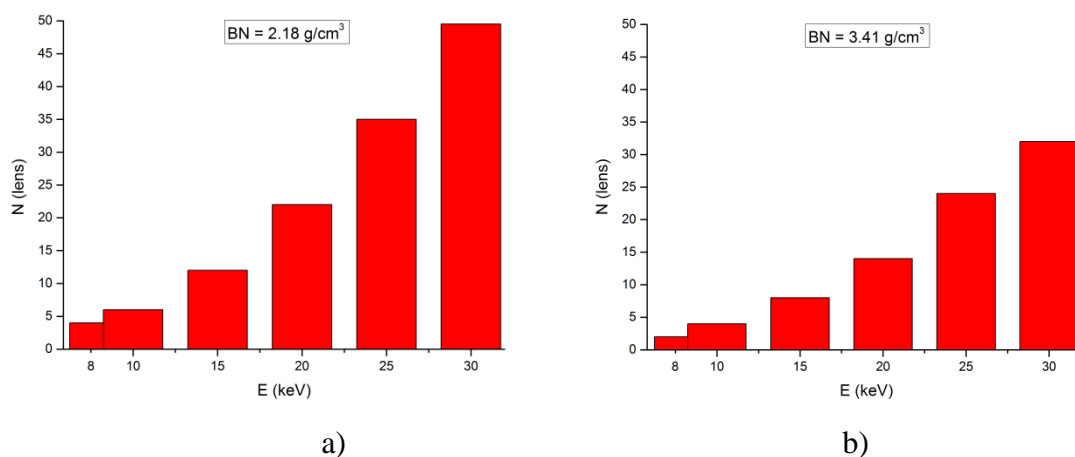


Рисунок 3 – Число требуемых линз для достижения фокусного расстояния 1 м. При расчетах радиус кривизн линзы принимался равным 0.05 мм. (а) гексагональная фаза BN с плотностью 2.17 г/см³; (б) кубическая фаза BN с плотностью 3.41 г/см³.

Из рис. 3 можно непосредственно увидеть, что более плотная кубическая модификация нитрида бора требует значительно меньшее количество единичных элементов, нежели менее плотная гексагональная модификация. При этом стоит отметить, что потери интенсивности излучения в обоих случаях одинаковы [2].

Минимизация числа единичных элементов в СПРЛ, тем не менее, никак не связана с достижением рекордно-высоких оптических параметров, таких как дифракционный предел, или усиления линзы. Оба параметра зависят, в основном, от эффективной апертуры СПРЛ. Сравнение эффективной апертуры ряда материалов представлено на рис. 4.

Новое поколение источников синхротронного излучения вместе с лазерами на свободных электронах со значительно возросшей бриллиантностью излучения но высокими тепловыми нагрузками накладывают дополнительные требования на материал линзы, такие как высокая температура плавления, теплопроводность, химическая стабильность и низкое теп-

ловое расширение. Ввиду этого целесообразно рассмотреть материалы, которые помимо хороших оптических свойств обладают также высокой химической и тепловой стабильностью.

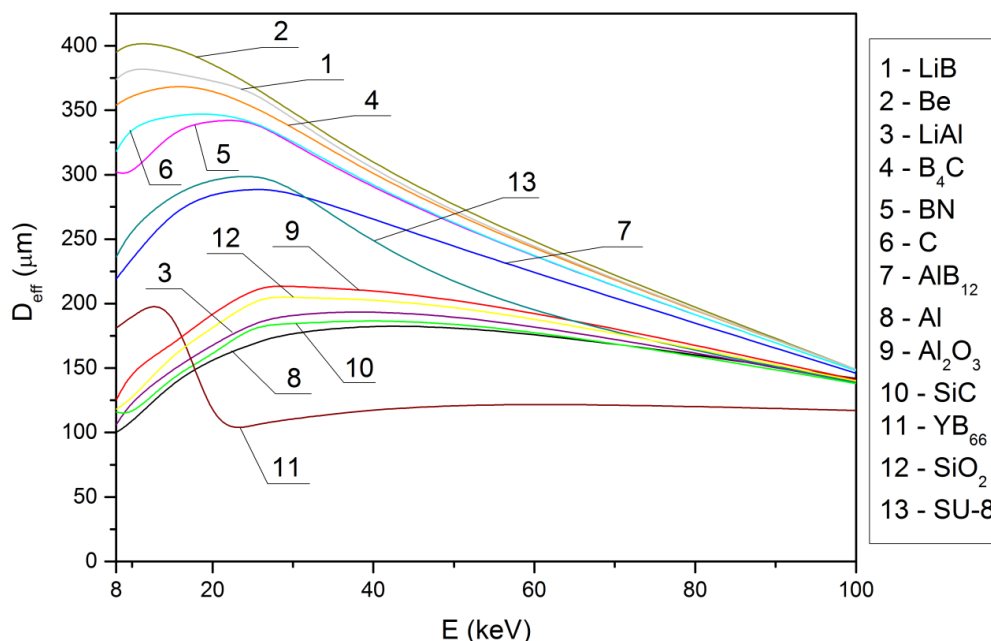


Рисунок 4 – Эффективная апертура ряда материалов.

В данной работе исследованы характеристики перспективных и широко используемых материалов. Определены ключевые параметры, такие как коэффициенты поглощения и преломления, эффективная апертура, число единичных линз, а также температура плавления. В соответствии с введенными параметрами анализ оптимальных материалов проведен на количественной основе при различных энергиях. В дополнении, рассмотрена роль внутренней структуры на рентгено-оптические свойства материала. Среди материалов отдельное внимание уделено бинарным соединениям, которые ранее не были исследованы в контексте преломляющей рентгеновской оптики.

Данная работа поддержана Министерством Образования РФ, а также российско-белорусским грантом РФФИ и БРФФИ (проект Ф16Р-070, проекты nos.14.Y26.31.0002 and 16-52-00212).

Список литературы

1. A. Snigirev, V. Kohn, I. Snigireva, B. Lengeler, Nature 384, 49 (1996).
2. D. Serebrennikov, E. Clementyev, A. Semenov, A. Snigirev, J. Synchrotron Rad. 23, 1315-1322 (2016).
3. M. Polikarpov, I. Snigireva, J. Morse, V. Yunkin, S. Kuznetsov, A. Snigirev, J. Synchrotron Rad. 22, 23-28 (2015).
4. A. Snigirev, I. Snigireva, M. Lyubomirskiy, V. Kohn, V. Yunkin, S. Kuznetsov, OPTICS EXPRESS 22, v. 21? 216861 (2014).