

Васенков А.А., Мулипанов Г.Н.,
Мазуренко С.Н., Скринский А.Н.
Глускин Е.С.

СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

Основной тенденцией развития микроэлектроники является повышение степени интеграции и быстродействия микросхем. В ближайшие 10–15 лет должны быть созданы ультра БИС с размерами элементов 0,8–0,3 мкм. Уменьшение размеров элементов ИС позволяет существенным образом повысить быстродействие схем и уменьшить потребляемую мощность. Переход к субмикронным размерам в плане влечет за собой переход к субмикронным размерам и по вертикали. Необходимо обеспечить надежное и устойчивое формирование функциональных слоев толщиной вплоть до нескольких нанометров. Вместе с тем создание столь малых субмикронных размеров требует качественных изменений в технологии микроэлектроники, обеспечивающих не только высокую прецизионность, но и многократное снижение дефектности. Возникает необходимость глубокого изучения физических явлений и химических процессов на атомарно-молекулярном уровне, фундаментальных исследований материалов и субмикронных структур.

Для этого необходимо:

- разработка и промышленное освоение субмикронной литографии;
- развитие высокоточных методов исследований и анализа материалов, структур и технологических процессов;
- разработка низкотемпературных методов обработки пластин, использующих радиационно-стимулированные процессы.

Высокая сложность изделий и экстремальные требования к параметрам материалов и технологических процессов потребуют, вероятно, осуществить переход от групповой к индивидуально-

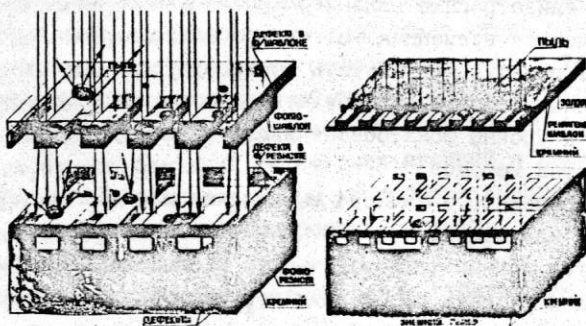
групповой обработке пластин, на базе разработки новейших полностью контролируемых и автоматизированных процессов "безлюдной" технологии. Сложность и многообразие стоящих проблем требуют комплексного подхода к их решению, в том числе широкого применения синхротронного излучения (СИ).

Основанием для этого служит то, что СИ, обладая такими уникальными характеристиками, как [1]:

- непрерывность спектра от области инфракрасного излучения до жесткого рентгеновского излучения (500–0,01 нм), такой диапазон спектра излучения невозможно получить ни одним из известных в настоящее время методов;
 - высокая спектральная яркость в любой области спектра примерно в 10^2 – 10^4 раз большая, чем, например, для самых мощных рентгеновских трубок, средняя мощность источников СИ практически в любой области спектра превосходит среднюю мощность лазерных источников;
 - высокая естественная коллимация не хуже – 10^{-4} радиан обеспечивающая плоскопараллельность пучка;
 - линейная поляризация в плоскости орбиты, позволяющая изучать анизотропные явления;
 - четкая временная структура (длительность импульса до 100 пс), позволяющая изучать быстротекущие процессы;
 - низкий фон и как следствие этого высокое отношение сигнала к уровню фона, обеспечивающее большую чувствительность большинства методов;
 - возможность точного вычисления и стабильность характеристик излучения;
- становится мощным технологическим и исследовательским инструментом для решения проблемных вопросов развития микроэлектроники (рис. .).

СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ - САМЫЙ ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

	СБИС			УБИС		
УРОВЕНЬ ИНТЕГРАЦИИ	64к	256к	1м	4м	16м	64м
МИНИМ. РАЗМЕР ЭЛЕМЕНТА	3мкм	1,5мкм	1мкм	0,8 мкм	0,5 мкм	0,3 мкм
СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ	ФОТОЛИТОГРАФИЯ СО СВЕТОБЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ $\lambda = 0,250 - 0,450$			РЕКТГЕНОЛИТОГРАФИЯ С СИНХРОТРОННЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ $\lambda = 0,020$ мкм		
КРИТИЧЕСКИЙ РАЗМЕР ДЕФЕКТОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ % ГОДНЫХ	0,1-2 мкм	0,8-1 мкм	0,5-0,8 мкм	0,2-0,5 мкм	0,1 мкм	0,05 мкм
АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ, КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ	СТАНДАРТНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ			КАЧЕСТВЕННО НОВЫЕ ПРЕЦИЗИОННЫЕ ЭКСПРЕССНЫЕ ИСПОЛЬЗУЮТ СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ Позволяет в несколько раз повысить % годных на основе автоматизированной безлюдной технологии		



Рентгенолитография в пучках СИ

Из-за дифракционных искажений, обусловленных волновой природой излучения, минимальные размеры элементов ИС, которые можно создать с помощью ультрафиолетового излучения ($\lambda = 200 + 400$ нм), составляют 1-2 мкм, что ограничивает возможности традиционного метода фотолитографии в создании ультра БИС с субмикронными размерами элементов. Поэтому повышение уровня интеграции ИС требует разработки новых литографических методов, использующих более коротковолновые виды излучения, таких как рентгеновская и электронно-лучевая литография. Однако у электронно-лучевой литографии имеются серьезные недостатки, ограничивающие ее использование для массового промышленного производства ИС, главным из которых является очень низкая производительность. Наиболее перспективным методом массового выпуска ультра БИС с субмикронными размерами элементов является рентгенолитография. Мощным источником "мягкого" рентгеновского излучения, применение которого обеспечивает наибольшую производительность технологии рентгенолитографии и позволяет наиболее полно реализовать ее потенциальные возможности, является синхротронное излучение [2].

Проведенные аналитические и экспериментальные исследования процесса рентгенолитографии с применением синхротронного излучения показали, что СИ позволяет существенно поднять производительность метода по сравнению с другими типами источников; работать в диапазоне длин волн $1 < \lambda < 4$ нм, что обеспечивает высокий контраст рентгеношаблонов ($K > 10$) и высокое разрешение ~ 10 нм; проводить печать с зазором, увеличивая тем самым срок службы рентгеношаблонов и повышая процент выхода годных микросхем.

Результаты анализа различных систем литографии (таблица): оптический, ультрафиолетовой электронно-лучевой, ионно-лучевой и рентгенолитографии показывают, что рентгенлитография в пучках СИ по совокупности параметров - разрешающая способность, производительность, слабая чувствительность к дефектам органического происхождения, имеет наибольшие преимущества. Особое

Таблица

СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ МИКРОЛИТОГРАФИИ

	МИКРОЛИТОГРАФИЯ	РАЗРЕ-	ГЛУБИНА	ПРОЗВО-	ЧУВСТВИ-	СТОИМОСТЬ	
		ШЕНИЕ					
		МКМ	МКМ	НОСТЬ φ 100 мкм	НОСТЬ К ДЕФЕК- ТАМ	ВАННЯ Т. ДОЛЛ.	ПРИМЕЧАНИЕ
1	ОПТИЧЕСКАЯ КОНТАКТНАЯ	2 ÷ 3	1 ÷ 10	50	ОЧЕНЬ ВЫСОКАЯ	30	
2	ОПТИЧЕСКАЯ ПРОЕКЦИОННАЯ	0.7 ÷ 1.0	1.0	60	ВЫСОКАЯ	185	
3	УФ-ПРОЕКЦИОННАЯ	0.6 ÷ 0.9	1.0	50	ОЧЕНЬ ВЫСОКАЯ	РАЗРАБОТКА	
4	ПРОЕКЦИОННАЯ С МУЛЬТИПЛИЦИРОВАНИЕМ	0.7 ÷ 1.0	1.0	20	ВЫСОКАЯ	800	
5	а) ЭЛЕКТРОННО- ЛУЧЕВАЯ	0.5	5.0	5 ÷ 10	ВЫСОКАЯ	3000	ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ СНИЖАЕТСЯ С УМЕНЬШЕНИЕМ РАЗМЕРОВ ЗА-ТОВА
	б) ЭЛЕКТРОННО- ЛУЧЕВАЯ ВЫСОКОСКОРЯСТНАЯ	0.1					
6	ИОННО-ЛУЧЕВАЯ	0.1 ÷ 0.5	5.0	5 ÷ 10	ВЫСОКАЯ	3000	РАЗРАБОТКА
7	РЕНТГЕНОВСКАЯ (ТОЧЕЧНЫЙ ИСТОЧНИК)	0.3 ÷ 0.5	10	20	НИЗКАЯ	1000	МАЛАЯ ДЕФЕКТ- НОСТЬ ЗА СЧЕТ НЕЧУВСТВИ- ТЕЛЬНОСТИ РЕНТГ. ИЗЛУЧЕНИЯ
8	РЕНТГЕНОВСКАЯ (С ИСПОЛЪЗ. СИ)	< 0.1	50 ÷ 100	50 ÷ 70	НИЗКАЯ	1000 ÷ 1500	СТОИМОСТЬ В ПЕРЕСЧЕТЕ НА КАНАЛ

преимущество рентгенолитографии с использованием СИ, обеспечивающее высокую надежность данного метода в формировании ИС с субмикронными размерами элементов, — это 100-кратное увеличение глубины резкости изображения (~ 100 мкм), недоступное всем существующим системам. При этом следует отметить, что альтернативное противопоставление различных литографических методов не корректно. Разные методы дополняют друг друга. Так, для рентгенолитографии необходима электронно-лучевая литография как генератор изображения при создании эталонных рентгеношаблонов. Таким образом, рентгенолитография с использованием СИ является наиболее перспективным литографическим методом.

Радиационно-стимулируемые технологические процессы с применением СИ

Причины возникновения большого числа дефектов, начиная от кластеров и кончая изгибом пластин, связаны с высокотемпературными технологическими процессами обработки пластин. Поэтому разработка прецизионной бездефектной субмикронной технологии требует перехода к низкотемпературным "сухим" технологическим процессам. Одним из наиболее перспективных направлений является разработка радиационно-стимулируемых с применением ультрафиолетового и рентгеновского излучений технологических процессов. Механизм данных процессов прост: под действием высокоэнергетических фотонов происходит диссоциация или ионизация молекул с образованием реактивных радикалов, которые и взаимодействуют с поверхностным субстратом, вызывая либо процессы травления, либо процессы осаждения пленок. В настоящее время в работах по исследованию данных процессов используются лазеры, различные типы ламп, а также СИ. Сравним возможности данных источников излучения. Следует отметить, что излучение мощного лазера превосходит СИ по спектральной яркости. В то же время вся мощность лазера концентрируется в узком спектральном интервале, а мощность СИ распределена в широкой области спектра, в большей части которой еще не существуют ни лазерных, ни ламповых источников, позволяя тем самым индуцировать существенно большее число стимулированных

процессов. С другой стороны, последние успехи в области создания специальных устройств генерации СИ, так называемых "зме-ек" и ондуляторов, в которых излучение испускается электронными пучками, колеблящимися в периодических магнитных полях по синусоидальному закону, приводит к спектральной концентрации СИ и даже к возможности создания лазера на свободных электронах в области вакуумного ультрафиолета и рентгеновского излучения. Кроме того, в случае использования лазеров получают маленькую скорость обработки больших полей. Возможности СИ для этих целей гораздо шире. СИ имеет широкий спектр излучения от 10 мкм до 0,01 нм (энергия фотонов от 0,1 эВ до 100 кэВ), интенсивность $10^{15} - 10^{17}$ фотон/см² с, т.е. охватывает области инфракрасного, ультрафиолетового и рентгеновского излучения. Благодаря такому широкому спектру СИ позволяет изучить спектральную зависимость резонансных процессов. Таким образом, СИ является универсальным источником для исследований и разработки радиационно-стимулированных процессов и основой для разработки требований к соответствующему спец. технологическому оборудованию.

Аналитические исследования с применением СИ.

Решение задач создания ультра ЕИС с низкой себестоимостью возможно лишь на пути создания бездефектной технологии с высоким процентом выхода годных.

Переход к субмикронным размерам элементов требует кардинального пересмотра наших представлений о проблеме дефектности исходных материалов, функциональных слоев и физико-химическом состоянии поверхностей и границ раздела. Если дефекты субмикронных размеров для элементов в несколько мкм малозначительны, то при переходе к субмикронным размерам элементов они становятся определяющими. Важно уметь как обнаружить дефекты уже в нанометровом диапазоне размеров, так и на основе изучения природы и механизмов возникновения дефектов научиться избегать их появления в процессе получения исходных материалов и структур. В связи с этим резко возрастает удельный вес ис-

следований и контроля параметров структур с использованием новых прецизионных аналитических методов исследований, определяемых физическими и химическими свойствами поверхностей, границ раздела и т.д.

Решение вышеперечисленных проблем возможно на базе широкого применения синхротронного излучения в исследованиях и диагностике. Высокая спектральная яркость СИ, высокая пространственная когерентность, определяемая малым размером источника и большим расстоянием до исследуемого образца, возможность перестройки по длинам волн, высокая степень естественной поляризации дают мощный импульс развитию рентгенодифракционных методов диагностики исходных материалов функциональных слоев, поверхности, приповерхностных слоев и границ раздела.

Резкое возрастание детектируемого сигнала над уровнем фона дает не только повышение чувствительности и точности измерений, но и резко сокращает время эксперимента с десятков часов до минут и даже секунд, существенно упрощается регистрирующая и управляющая аппаратура, имеется возможность отказаться от сложных дорогостоящих электронных систем регистрации и накопления малых сигналов.

Высокая яркость СИ позволяет без ущерба для результатов эксперимента увеличить расстояние: исследуемый образец-детектор. Таким образом, появляется возможность проведения экспериментов *in situ* непосредственно в технологическом процессе, например начальных стадий эпитаксиального роста при молекулярно-лучевой эпитаксии. Возможно сочетание в одном вакуумном объеме рентгенодифракционных методов диагностики поверхности с другими методами исследования поверхности (дифракция медленных электронов и оже-спектроскопии).

Использование временной структуры СИ позволяет осуществить и время-разрешающие *in situ* эксперименты, например, процесса лазерной перекристаллизации, если период прохождения электронных пучков по орбите синхронизирован с частотой лазерных импульсов. Появляется возможность впервые

осуществить практически 100% входной и пооперационный экспресс-контроль исходных материалов, эпитаксиальных структур, функциональных слоев и пленок. Такая паспортизация необходима при переходе к технологии индивидуальной обработки пластин при исключительно высоких требованиях к стабильности проведения процессов, необходимой при создании ультра БИС, и позволит повысить выход годных изделий.

Чрезвычайно перспективным представляется использование СИ в рентгеновской дифракционной топографии. Метод экспресс-топографии в сплошном спектре СИ позволит осуществить 100% паспортизацию пластин при входном контроле общего структурного совершенства монокристаллов за время экспозиции в несколько секунд по сравнению с несколькими часами при использовании рентгеновских трубок. При этом необходимо отметить, что при использовании СИ упрощается как сам эксперимент т.к. не требуется высокоточной установки образца (для большинства исследований достаточна точность установки доли градусов, а не секунды), так и интерпретация экспериментальных результатов, поскольку обеспечивается получение на одной лауэ-топограмме нескольких рефлексов. При сравнимом разрешении на синхротронных и обычных рентгенограммах времена экспозиции для получения синхротронных рентгенограмм кремния в нескольких отражениях существенно меньше (до трех секунд) по сравнению с 1,5-2 часами для получения обычных топограмм в одном отражении. Наиболее ярко эффектность использования рентгено-топографии в СИ проявляется при исследовании сильно поглощающих рентгеновское излучение материалов, используемых в микроэлектронике, таких как арсенид галлия, фосфид индия и гадолиний-галлиевый гранат, исследование которых на рентгеновской трубке из-за их большого массового коэффициента поглощения рентгеновских лучей затруднено, что заставляет при их контроле ограничиваться применением в основном методов на отражение, а не на прохождение [4].

Монохроматизация излучения и возможность перестройки

по длинам волн позволяет реализовать методы топографии вблизи края поглощения и, таким образом, осуществить визуализацию распределения примесных атомов и процессов осаждения и сегрегации примесей на дефектах.

Использование временной структуры СИ позволяет осуществить постановку методов время/разрешающей топографии в режиме стробирования, например для исследований фазовых превращений. Высокая спектральная яркость источника СИ позволяет осуществить прямое преобразование рентгено-топографических изображений в видимое с помощью рентгеновидиконсв, лучший уровень разрешения которых \sim бмкм. Однако это разрешение может быть улучшено за счет предварительного увеличения рентгено-топографического изображения в несколько десятков раз [5]. Таким образом, может быть достигнут субмикронный уровень разрешения в топографии на пучках СИ.

Одной из главных проблем при разработке современной кремниевой технологии геттерирования дефектов является визуализация микродефектов. С целью повышения чувствительности к слабым полям деформации, создаваемым микродефектами до 10^{-6} - 10^{-7} по сравнению с 10^{-4} в однокристалльных методах, применение СИ позволяет без особого ущерба для потери интенсивности реализовать многокристалльные методы рентгеновской топографии. Методы рентгеновской топографии высокого разрешения в пучках СИ позволят обеспечить исследования и контроль наличия микродефектов как в исходном материале, так и инициируемых при различных воздействиях в технологическом процессе за время экспозиции порядка нескольких минут по сравнению с десятками часов при использовании рентгеновских трубок при сравнимом разрешении.

Возможности применения СИ позволили поднять на новый уровень методы исследования химического состава, структуры и электронных свойств поверхности и приповерхностных слоев. В данных методах регистрируется не рассеянное рентгеновское излучение, а вторичные сигналы. Такими сигналами могут быть либо флуоресцентное излучение, либо фотоэлектроны, вылетающие из

кристалла.

Так, метод дифракционного неразрушающего исследования в пучках СИ – метод стоячих рентгеновских волн, в котором регистрируются вторичные излучения, позволит исследовать структуру поверхности и границ раздела в процессах роста и осаждения функциональных слоев и пленок, обеспечивает исследования атомной структуры поверхности, границ раздела и адсорбированных слоев, толщин деформированных и переходных слоев, профиля распределения примесей. При этом высокая интенсивность СИ позволяет на два порядка сократить время измерений, значительно понижается нижний предел числа исследуемых атомов. Так, в случае ионной имплантации можно исследовать образцы с концентрацией примесных атомов порядка 10^{13} ат/см², а в случае адсорбции – одну сотую монослоя, кроме того, можно значительно повысить локальность исследований за счет использования узких пучков [6].

Одним из наиболее эффективных методов исследования поверхностей и границ раздела твердых тел является фотоэлектронная спектроскопия. Она широко используется в микроэлектронике для исследования химического состава поверхности полупроводников, стехиометрии диэлектрических пленок, барьеров Шоттки, границ раздела в гетеропереходах.

В настоящее время наиболее полную информацию об электронных состояниях поверхностей и приповерхностных слоев дает метод фотоэлектронной спектроскопии в поляризованных пучках СИ с разделением фотоэлектронов как по энергии, так и по углу вылета [7]. Применение СИ позволяет существенно упростить ключевую проблему не только фотоэлектронной спектроскопии, но и всех фотоэмиссионных методов исследований – проблему интеграции результатов.

Широкие возможности открывает применение СИ в методе флуоресцентного анализа для экспресс-исследований энергоносителей, материалов и структур [8]. Данный метод обладает следующими достоинствами: высокая чувствительность (до 10^{-7} – 10^{-8} г/г для К-линий элементов от Zr до Au при времени измерений 10^2 – 10^3 с), малый объем и масса изучаемого образца (до 0,1 мг),

неразрушающий характер измерений.

Применение СИ в исследованиях структуры неупорядоченных систем позволяет поднять на новый уровень возможности метода спектроскопии тонкой структуры края поглощения – EXAFS спектроскопии. Данный метод позволяет определить структуру аморфных материалов и все шире и шире применяется для исследований неупорядоченных твердых растворов $Ga_{1-x}In_xAs$, силицидов металлов и т.д. [9].

Как следует из вышеизложенного, синхротронное излучение является мощным инструментом субмикронной технологии и прецизионных аналитических исследований. Кроме того, хотелось бы отметить еще одну область прикладного использования СИ – метрологию. Точно рассчитываемые характеристики СИ и возможность работы с малым количеством электронов в накопительном кольце, когда их можно считать поштучно, позволяют использовать СИ в качестве эталонного источника в области вакуумного ультрафиолета и рентгеновского излучения.

В качестве эталонного источника СИ позволяет:

- абсолютно калибровать вторичные стандарты и источники излучения (рентгеновские трубки, газоразрядные лампы и т.д.);
- эталонировать и калибровать приемники излучения, фильтры, монохроматоры, дозиметрическую аппаратуру и т.д.

Успехи в области разработки и создания ускорительной техники открыли широкие перспективы по использованию СИ в прикладных исследованиях и технологии. В настоящее время мощными источниками СИ являются специализированные накопительные кольца электронов, оснащенные специальными устройствами генерации СИ (сверхпроводящими "змеями" и индукторами), позволяющими получать сверхяркие пучки СИ. Интенсивно ведутся работы по разработке комнатных промышленных источников СИ на основе сверхпроводящих магнитов. Хотелось бы отметить еще одну особенность использования в качестве источников СИ накопительных колец. Благодаря большому времени жизни пучка электронов в накопителе (5–10 нс) потери частиц в единицу времени на много порядков (10^5) меньше, чем в обычных ускорителях, поэтому вокруг накопителя практически полностью отсутству-

ют наведенная активность и радиационный фон. Это существенно упрощает проведение экспериментальных работ и позволяет использовать короткие каналы вывода СИ длиной 1-10 м.

Следует отметить, что оборудование, предназначенное для работ с применением СИ, существенно отличается от оборудования, в котором используются обычные источники излучения. Недостатком СИ как источника излучения на сегодняшний день является трудность создания рентгеновской оптики для проведения анализа, кроме того, следует отметить, что для полного комплексного решения вопросов аналитических исследований и контроля материалов, структур и технологических процессов необходимо дополнить интегральные методы исследований на пучках СИ аналитическими методами исследований, позволяющими проводить локальный анализ (оптические, электронно-оптические методы вторично-ионная масс-спектрометрия и т.д.)

ВЫВОДЫ

Применение синхротронного излучения в технологических процессах и аналитических методов исследований для решения задач микроэлектроники позволит:

- разработать наряду с промышленной технологией рентгенолитографии в пучках СИ целый комплекс низкотемпературных радиационно-стимулированных процессов микротехнологии, необходимых для создания ультра БИС с субмикронными размерами элементов;
- определить степень кристаллического совершенства материалов и структур;
- управлять распределением примесей и дефектов, как в исходных материалах, так и на различных этапах технологических процессов;
- проводить глубокий анализ причин отказов ИС, факторов, определяющих выход годных ИС, и тем самым повысить качество и надежность изделий микроэлектроники.

Результаты комплексных аналитических исследований являются основным источником при формировании банка данных для приборно-технологического базиса САПР ультра БИС и должны обеспечить создание управляемой технологии ультра БИС.

Литература

1. Кулипанов Г.Н., Скринский А.Н. Использование синхротронного излучения: состояние и перспективы. УФН, 1977, т. 122, вып. 3, с. 369.
2. Heuberger A. X-ray lithography. Solid State Technol., 1986, v. 29, p. 93.
3. Cerina F., Lai B., Wells G.M., Wiley J.R., Kilday D.G., Margaritondo G. Synchrotron radiation induced surfaces nitridation of Si. Appl. Phys. Lett., 1987, 50, 9, March, p. 533-534.
4. Васенков А.А., Кулипанов Г.Н., Литвинов Ю.М., Мазуренко С.Н., Михайлов М.А., Панченко В.Е. Контроль дефектов и рентгенографические исследования материалов микроэлектроники с использованием синхротронного излучения. Электронная промышленность, 1986, в. 3 (151), с. 64-66.
5. Boettinger W.C., Dobbin M.R., Bourdette H.E. Real time topography with x-ray image magnification. Nuclear Instrum Meth., 1982, v. 195, № 1-2, p. 355-361.
6. Ковальчук М.В., Кон В.Г. Рентгеновские стоячие волны - новый метод исследования структуры кристаллов. УФН, 1986, т. 149, в. 1, с. 69-103.
7. Синхротронное излучение. Свойства и применения. Под ред. К. Кунца. М.: Мир, 1981.
8. Барышев В.Б., Кулипанов Г.Н., Скринский А.Н. Рентгенофлуоресцентный анализ использования синхротронного излучения 1986, Препринт ИЯФ СО АН СССР № 86-26.
9. Mikkelsen J.C., Boyce J.B. Extended x-ray absorption fine structure study of GaAs. Phys. Rev. Letters. 1982, v. 49, № 19, p. 1412.