

Алмаз является не только основой для изготовления дорогих украшений или материалом для инструментов, но и полупроводником. Благодаря его уникальным физическим свойствам на базе алмаза возможно создание полупроводниковых электронных приборов, которые будут обладать большой мощностью, высоким быстродействием и работать в экстремальных условиях - при высоких температурах, в присутствии ионизирующих излучений. По многим параметрам алмаз превосходит другие, используемые в настоящее время, полупроводники.

Однако, для создания полупроводниковых приборов на алмазе необходимо решить проблему его *легирования*. Дело в том, что в алмазе при увеличении концентрации легирующей примеси до необходимого уровня из-за возникающих дефектов кристаллической решетки падает подвижность свободных носителей заряда. Этот параметр характеризует то, насколько быстро носители заряда будут двигаться под действием электрического поля. Высокая подвижность необходима для обеспечения быстродействия и мощности полупроводникового прибора.

Решение этой проблемы может быть в создании так называемых дельта-легированных слоев, известных по другим полупроводникам. Дельта слой – это чрезвычайно тонкий, порядка 1-2 нм слой, в котором находится легирующая примесь. На таких малых масштабах принципиально важны квантовые, волновые свойства носителей заряда. В силу принципа неопределенности их положение не может быть задано точнее, чем длина волны де Бройля, равная нескольким нанометрам. Получается, что хотя легирующая примесь и находится в тонком слое, носители заряда «расплываются» в область чистого алмаза с неповрежденной кристаллической решеткой, где они обладают высокой подвижностью. На рисунке 1 показаны результаты проведенных в нами расчетов концентрации носителей в дельта-слое для различных профилей концентрации примеси. Хорошо видно, что носители распределены шире, чем легирующая примесь. Еще большие преимущества дает использование двойного дельта-слоя, состоящего из двух, рядом расположенных более тонких легированных слоев. В силу принципа неопределенности, носители заряда будут двигаться как в одном дельта-слое, но их эффективная подвижность будет еще больше. Дельта-легирование позволяет получить большую подвижность носителей при их высокой концентрации.

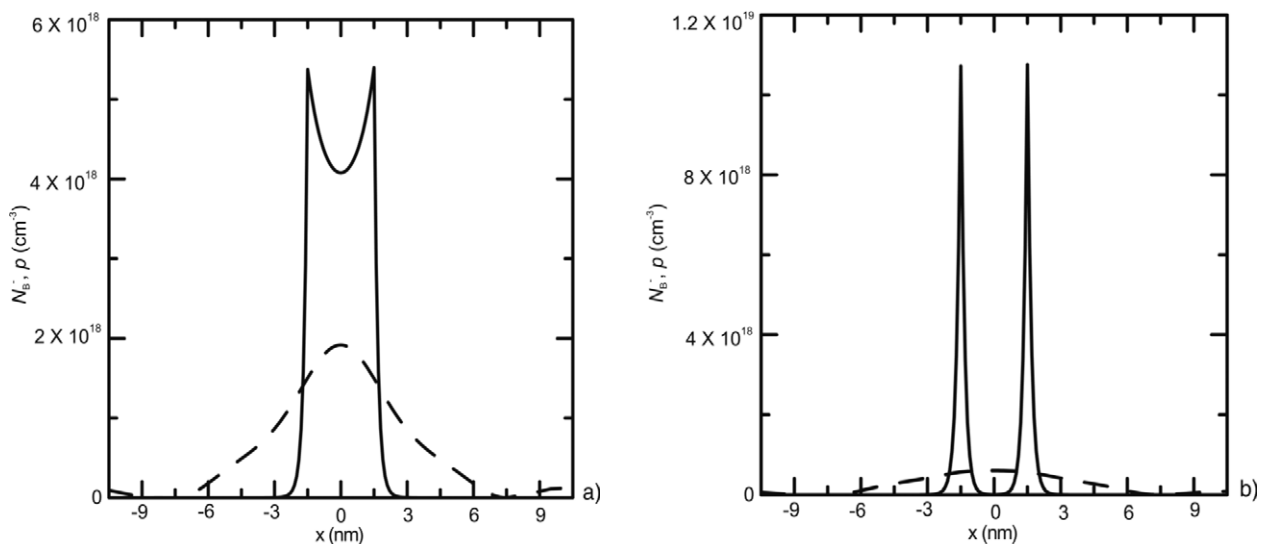


Рисунок 1. Распределение концентраций ионизированной примеси бора N_B (сплошная линия) и дырок p (пунктир): а) для одиночного дельта слоя, б) для двойного дельта слоя.

Таким образом, основной задачей для алмазной электроники является разработка технологии создания дельта-легированного алмаза. Мы взяли за решение этой задачи в рамках мегагранта Правительства РФ на проведение исследований под руководством ведущего иностранного ученого Джеймса Батлера (США), известного специалиста в области синтеза алмаза и его применений. В ходе этих исследований в ИПФ РАН был разработан новый реактор для плазмохимического CVD синтеза алмаза, позволяющий получать дельта-легированные слои алмаза. CVD (chemical vapor deposition) – это осаждение из газовой фазы, метод при котором алмаз собирается из атомов углерода как дом из кирпичей. Для этого создается газовый разряд, нечто среднее между разрядом в энергосберегающей лампе и тем, что используется при электросварке. Только для синтеза алмаза используется безэлектродный разряд, создаваемый электрическим полем микроволнового излучения, такого же, как в микроволновой печи, но большей мощности. Под действием разряда молекулы углеродсодержащего газа разбиваются на части. Эти осколки молекул, радикалы, вступают во множество химических реакций, как в объеме газоразрядной плазмы, так и на поверхности растущего алмаза.

Метод CVD синтеза алмаза исследуется уже не один десяток лет, в том числе и в нашем институте. Этим методом удается выращивать монокристаллы алмаза с качеством превышающим природные. Нами в этой области был получен целый ряд новых результатов и накоплен большой опыт. Проведенный анализ предшествующих работ, в которых не удалось получить дельта-легированные слои с необходимыми параметрами, показал, что для решения данной проблемы не обойтись модернизацией существующих CVD реакторов синтеза алмаза и потребуется разработка нового, а также решение ряда сопутствующих задач.

Во-первых, потребовалось разработать методы подготовки алмазных монокристаллических подложек, которые обеспечивают их малую шероховатость (доли нанометра), которая сохраняется в процессе CVD роста монокристалла. Во-вторых, была разработана система подачи смеси газов в реактор, которая обеспечивает быстрое переключение газовой смеси, не содержащей легирующую примесь, на смесь, содержащую примесь, и наоборот. Это было достигнуто за счет организации в реакторе ламинарных потоков газа без вихрей и застойных зон и применения сложной системы клапанов и регуляторов расхода различных газов. В свою очередь новая организация движения газов потребовала разработки новой электродинамической конфигурации реактора. Мы провели расчеты различных вариантов реактора, выбрали оптимальный, изготовили, запустили и отладили его. В-третьих, экспериментально были найдены режимы медленного роста монокристаллического алмаза со скоростью около сотни нанометров в час. Медленный рост и быстрая смена состава газов обеспечили переход от осаждения чистого алмаза к росту легированного буквально в течении формирования одного атомного слоя.

Все это дало нам возможность получить дельта-легированный бором монокристаллический алмаз. На рисунке 2 показан профиль концентрации бора в четырех дельта-слоях, выращенных при различном содержании легирующей примеси в смеси газов. Профиль концентрации был измерен методом вторично-ионной масс-спектрометрии в Институте физики микроструктур РАН.

Таким образом, в результате проведенной работы, которая заняла два с половиной года, нам удалось создать новый реактор для получения дельта-легированного монокристаллического алмаза, пригодного для изготовления полупроводниковых приборов.

*А.М. Горбачев, к.ф.-м.н.,
зав.лабораторией физики СВЧ-разряда*

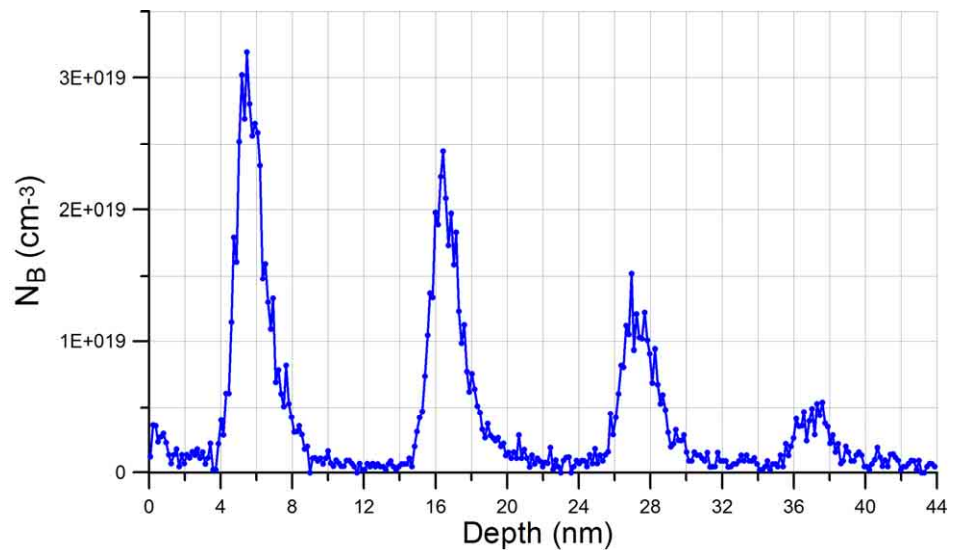


Рисунок 2. Зависимость концентрации бора от глубины в четырех дельта-слоях, выращенных при различном содержании легирующей примеси в смеси газов.