

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЗОТОПОВ БОРА И ОБЛУЧЕНИЕ НЕЙТРОНАМИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ *p-n*-ПЕРЕХОДОВ В АЛМАЗНЫХ ПЛЕНКАХ

© Г.С.Карумидзе, Ш.Ш.Шавелашвили

Институт стабильных изотопов,  
380086 Тбилиси, Грузия  
(Получена 28 августа 1995 г. Принята к печати 31 августа 1995 г.)

Предлагается технологическая схема, дающая возможность получения *p-n*-переходов в алмазных пленках с помощью изотопов бора  $^{10}\text{B}$  и  $^{11}\text{B}$  с последующим облучением тепловыми нейтронами ядерного реактора.

Перспективность алмаза в полупроводниковом приборостроении определяется его уникальными параметрами, какими являются его большая ширина запрещенной зоны ( $E_g = 5.5$  эВ), высокое пробивное напряжение ( $10^7$  В/см), большая дрейфовая скорость носителей тока и атомная плотность. Благодаря высокой атомной плотности и сильным ковалентным связям алмаз обладает самой высокой твердостью, модулем упругости и наименьшим значением величины сжимаемости. Кроме того, удельная теплопроводность ( $2000$  Вт/мК) при  $300$  К выше удельной теплопроводности любого другого материала, а коэффициент теплового расширения при  $300$  К равен  $0.8 \cdot 10^{-6}$ , т.е. меньше, чем у любого другого материала [1]. В последнее время значительно возрос интерес к полупроводниковым алмазным пленкам, что обусловлено теми исследованиями [2], в которых было показано, что не существует принципиального запрета термодинамического характера на получение алмазных пленок при низких температурах и давлениях, и были получены полупроводниковые алмазные пленки из газовой фазы.

Естественно, что для применения алмазных пленок в электронной технике принципиальным становится создание технологических процессов по получению полупроводниковых алмазных пленок с заданными свойствами. В работах [3,4] были получены полупроводниковые алмазные пленки *p*-типа из газовых смесей  $\text{H}_2 - \text{CH}_4 - \text{B}_2\text{H}_6$  и показано, что бор оказывает необычайное каталитическое влияние на выращивание метастабильного алмаза. При этом известно, что наиболее оптимальной легирующей примесью для создания алмаза дырочной проводимости является бор, а электронной проводимости — литий [1]. Если

проблема создания алмазов  $p$ -типа более или менее решена в практическом плане, то создание алмазов  $n$ -типа проводимости с сильно легированными областями является технологически не решенной проблемой [1].

В работе [5] была высказана возможность создания алмазов электронной проводимости с помощью ядерной реакции



для чего алмаз предварительно легируется изотопом  $^{10}\text{B}$ , а в дальнейшем проводится его облучение тепловыми нейтронами ядерного реактора. Образованный в результате ядерной реакции  $\text{Li}$  является легирующей примесью. Для восстановления кристаллической структуры и электрической активности лития проводится термическая обработка при  $T \lesssim 1000^\circ\text{C}$  в течение 2 ч. В этих условиях происходит отжиг радиационных дефектов и восстановление электрической активности лития [6]. Перспективной и принципиальной для полупроводникового приборостроения на основе алмаза является возможность создания  $p$ - $n$ -перехода или структуры («сборки») алмазных и алмазоподобных пленок, в которой чередуются дырочная и электронная проводимости; такие сборки могут найти широкое применение в микроэлектронике.

Далее предлагается схема получения  $p$ - $n$ -перехода в алмазных пленках и создания структур на их основе. Первым этапом этой технологии является получение полупроводниковой алмазной пленки методом химического парового осаждения из газовой смеси  $\text{H}_2$ - $\text{CH}_4$ - $\text{B}_2\text{H}_6$  аналогично работам [3,4]. Однако в отличие от этих работ в предлагаемом методе газовая смесь, в частности боран, должна содержать высокую концентрацию изотопа  $^{11}\text{B}$ . После получения пленки нужной толщины, которая будет легирована изотопом  $^{11}\text{B}$ , технологический процесс нанесения алмазной пленки продолжается уже с помощью газовой смеси, в которой боран содержит изотоп  $^{10}\text{B}$  в высокой концентрации. После завершения технологического цикла, т.е. получения алмазной пленки, состоящей из двух слоев, содержащих изотоп  $^{11}\text{B}$  и  $^{10}\text{B}$ , проводится облучение полученной алмазной пленки тепловыми нейтронами ядерного реактора. Флюенс нейтронов, необходимый для полного перевода атомов  $^{10}\text{B}$  в атомы  $^7\text{Li}$ , составляет

$$\Phi = 1/\sigma = 2.56 \cdot 10^{20} \text{ н/см}^2, \quad (2)$$

где  $\sigma$  — сечение поглощения нейтронов изотопом  $^{10}\text{B}$ , равное  $3.9 \times 10^{-21} \text{ см}^2$ .

Естественно, что при облучении в той части пленки, которая содержит изотоп  $^{11}\text{B}$ , не будет протекать ядерная реакция, так как изотоп  $^{11}\text{B}$  имеет пренебрежимо малое сечение поглощения нейтронов. Ядерное поглощение будет происходить в слое пленки, содержащем изотоп  $^{10}\text{B}$ , и приведет к образованию атомов лития согласно реакции (1). Флюенс нейтронов определяется только лишь сечением поглощения нейтронов изотопом  $^{10}\text{B}$  (2) и не зависит от уровня легирования. Время облучения зависит от величины нейтронного потока и в том случае, если он равен  $10^{14} \text{ н/(см}^2 \cdot \text{с)}$ , составит 29.6 суток. Грубые оценки показывают,

что наведенная радиоактивность будет пренебрежимо малой величиной и определяется изотопом  $^{13}\text{C}$ , содержание которого в естественной смеси составляет примерно 1.2% и который имеет сечение активации  $\sigma \simeq 10^{-27} \text{ см}^2$ , а период полураспада 5570 лет. Наибольшую активность следует ожидать от примесей, которые могут сопровождать газовую смесь и изотопы бора. Однако если содержание основного вещества (т.е. изотопов) будет составлять более или порядка 99.5%, что легко может быть реализовано, и если принять меры по очистке газовых смесей, то наведенную радиоактивность можно довести до ничтожно малой величины. Радиоактивность, возникающая в результате ядерных реакций  $(n, 2n)$ ,  $(n, \alpha)$  на изотопах углерода, должна быть также пренебрежимо малой величиной из-за теплового спектра нейтронов и малых значений сечений реакции. После облучения следующим этапом является отжиг радиационных дефектов (температура облучения пленки  $T \simeq 300 \text{ К}$ ) и восстановление электрической активности бора (изотоп  $^{11}\text{B}$ ) и лития  $^7\text{Li}$ ), для чего проводится термическая обработка (температура отжига  $T_{\text{ann}} \leq 1000 \text{ К}$ , время отжига порядка 3 ч).

Описанным методом может быть получена алмазная пленочная сборка, в которой будут чередоваться слои алмаза дырочной и электронной проводимости. Количество слоев в сборке определяется допустимой величиной отклонения концентрации носителей заряда в слоях (и, следовательно, разбросом электрического сопротивления), которое в свою очередь определяется ослаблением нейтронного потока по толщине сборки.

#### Список литературы

- [1] Алмаз в электронной технике (М., Энергоиздат, 1989).
- [2] J.G. Angus, C.C. Hayman. Science, **244**, 913 (1988).
- [3] I.C. Ageus, H.A. Will, W.S. Stanko. J. Appl. Phys., **39**, 2915 (1968).
- [4] D.J. Proferd, N.C. Gardner, J.G. Angus. J. Appl. Phys., **44**, 1418 (1973).
- [5] G.S. Karumidze, G.A. Tevzadze, Sh.Sh. Shsavelashvili. Proc. 4th Europ. conf. on diamond, diamond-like and related materials, Sept. 20-24, 1994 (Portugal, Albufeira, Algarve, 1993) p. 175.
- [6] И.С. Вавилов. УФН, **145**, 929 (1985).

Редактор Т.А. Полянская

Application of isotopes of boron and neutron irradiation when obtaining  $p-n$  junction in diamond films

G.S. Karumidze, Sh.Sh. Shsavelashvili.

Institute for Stable Isotopes, 380086 Tbilisi, Georgia