

В. С. ВАВИЛОВ, М. А. ГУКАСЯН, М. И. ГУСЕВА,
Е. А. КОНОРОВА, В. Ф. СЕРГИЕНКО

ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЙ ПЕРЕХОД В АЛМАЗЕ, ПОЛУЧЕННЫЙ
ВНЕДРЕНИЕМ ИОНОВ БОРА И ФОСФОРА

(Представлено академиком Н. Г. Басовым 4 III 1971)

В настоящее время экспериментально установлено, что метод ионного легирования позволяет получить в алмазе полупроводниковые слои p - и n -типа (¹⁻³). Однако несмотря на полную воспроизводимость результатов в работах советских авторов по созданию этих слоев сообщений о $(p-n)$ -переходе в алмазе опубликовано не было. Одной из возможных причин этого было то, что в отличие от устойчивых слоев p -типа, полученных внедрением бора, слой n -типа необходимо было отжигать при температуре не выше 500—600°, так как при более высоких температурах отжига проводимость слоев падала до проводимости исходного кристалла. Поскольку при этих температурах отжига основная масса радиационных дефектов сохранялась, то следовало предполагать, что слои n -типа представляют собой сильно компенсированный полупроводник с малой подвижностью. Единственное упоминание о попытке осуществить $(p-n)$ -переход в алмазе содержится в (⁴). В естественный полупроводниковый алмаз методом ионного внедрения вводился фосфор. Диодные характеристики были получены, однако они, по-видимому, были обусловлены не наличием $(p-n)$ -перехода, а свойствами контакта графит — алмаз, что и признает автор (⁴).

Принципиальная возможность существования и получения полупроводникового алмаза n -типа представляет интерес как с физической, так и с практической точки зрения. Поскольку на солях алмаза n -типа э.д.с. Холла не могла быть измерена из-за малой подвижности, критерием полупроводникового (зонного) характера проводимости могли служить величина и знак термо-э.д.с. и, что особенно важно, наличие $(p-n)$ -перехода.

Целью работы, результаты которой приводятся ниже, было создание $(p-n)$ -перехода в алмазе методом ионного легирования. В качестве легирующей акцепторной примеси нами был выбран бор на основании результатов (²), а в качестве легирующей донорной примеси — фосфор. Во-первых, как один из элементов V группы таблицы Менделеева и, следовательно,

Таблица 1

Образец	68	43а	43б	55	96	96
Внедряемый ион	B ⁺	B ⁺	B ⁺	P ⁺	B ⁺	B ⁺
(Доза ионов на 1 см ²) × 10 ⁻¹⁵	1,25	1,25	1,25	1,25	1	1
Энергия ионов, кэВ	30	30	30	80	80	80
Температура внедрения, °С	600	600	600	300	100	<100
Отжиг	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	1400° С, 2 час.
Сопротивление слоя, R · 10 ⁻⁹ ом/см ² при T = 300° С	5	4	7	3,3-10	2,1	3 · 10 ⁻²
Термо-э. д. с. при 500° К, мВ	5 ± 2	4,5 ± 1,5	3,5 ± 1,5	2 ± 0,5	5 ± 2	12,5 ± 2

Примечание. Ошибка в измерениях термо-э. д. с., указанная в табл. 1, является экспериментально наблюдаемым отклонением при повторных измерениях и связана с колебаниями температурного перепада по образцу.

но, «естественный» донор, фосфор представляет наибольший интерес; во-вторых, график отжига слоев, легированных фосфором, позволяет предполагать, что при одинаковых дозах легирования фосфор дает большее число активных донорных центров, чем междоузельные атомы — литий и углерод⁽²⁾.

Для уменьшения числа радиационных дефектов внедрение ионов фосфора нами производилось при температуре 600° С. При таком внедрении дозы до $3 \cdot 10^{15}$ ионов на 1 см^2 при энергии ионов не более 80 кэв не вызывают графитизации. Отжиг образцов при более высоких температурах всегда приводит к увеличению сопротивления слоев. Э.д.с. Холла по-прежнему была очень мала, и знак носителей определялся по величине термо-э.д.с. при 500° К при перепаде температуры 10—15°⁽³⁾.

В табл. 1 приведены результаты измерения сопротивления и термо-э.д.с. образцов, легированных фосфором и бором.

Данные табл. 1 показывают, что величина термо-э.д.с. до высокотемпературного отжига заключена в пределах 200—500 мв на градус. Большие величины термо-э.д.с. указывают на полупроводниковый (зонный) характер проводимости, однако они значительно ниже значений термо-э.д.с., которые получены на образцах, легированных бором, после высокотемпературного отжига. Последние практически совпадают с величиной термо-э.д.с. естественного полупроводникового алмаза в⁽⁵⁾.

Для изготовления (*p-n*)-перехода нами были использованы наиболее чистые образцы естественных алмазов, которые отбирались методом, описанным в работе⁽²⁾. Образцы представляли собой полированные пластинки толщиной 200—300 м. Неоднократные попытки осуществить (*p-n*)-переход, плоскость которого лежала бы в плоскости легированного слоя, пока не привели к успеху. Ни в одном из случаев диодных характеристик получено не было. Так как конструкция (*p-n*)-перехода не позволяла четко контролировать отдельно *n*- и *p*-области, то установить причины неудач было очень затруднительно. Поэтому нами была выбрана схема расположения (*p-n*)-перехода, изображенная на рис. 1.

Согласно этой схеме, плоскость (*p-n*)-перехода лежит перпендикулярно плоскости легированных слоев *n*- и *p*-типа. Легирование проводилось следующим образом. Сначала в образец внедрялись ионы бора с энергией 25 кэв при дозе $2 \cdot 10^{14}$ ионов на 1 см^2 при комнатной температуре. Легированный слой представлял собой полоску с омическими контактами. Омические контакты получались путем дополнительного легирования ионами бора с энергией 5 кэв при дозе $1,5 \cdot 10^{15}$ ионов на 1 см^2 . Такая большая доза вызывала графитизацию поверхности алмаза при отжиге. После стравливания графита на поверхности оставался сильнолегированный слой, который обеспечивал контакт $p^+ - p$. После внедрения бора образец отжигался при температуре 1400° С в течение 2 час. Затем проводилось внедрение фосфора при температуре 600° С ионами с энергией 80, 60, 40, 20 кэв. Доза облучения для каждой энергии была равна $1,6 \cdot 10^{15}$ ионов на 1 см^2 . Такой способ внедрения обеспечивал почти однородное распределение фосфора по глубине образца.

Глубина проникновения ионов бора с энергией 25 кэв и фосфора с энергией 80 кэв оценивалась экспериментально по толщине графитизированного слоя алмаза при больших дозах облучения⁽²⁾. Глубина проникнове-

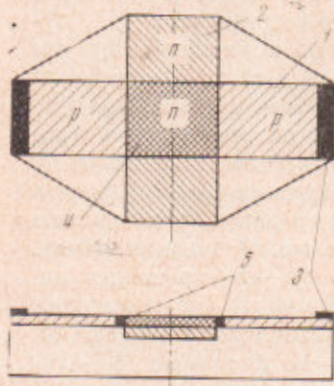


Рис. 1. Образец с (*p-n*)-переходами. 1 — *p*-область с внедренным бором, 2 — *n*-область с внедренным фосфором, 3 — омический контакт, 4 — *n*-область, бор перекомпенсирован фосфором, 5 — (*p-n*)-переходы

ния бора составляла $900 \pm 200 \text{ \AA}$, фосфора $1000 \pm 200 \text{ \AA}$. Знак термо-э.д.с. в области легирования бором и фосфором соответствовал проводимости n -типа при величине термо-э.д.с. 200 мв на градус. Как показано на рис. 1, на образце получалось два ($p-n$)-перехода. Площадь ($p-n$)-переходов равна произведению длины границы между p - и n -областями на глубину проникновения ионов и составляет около $2 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2$. На рис. 2 представлена вольт-амперная характеристика полученных ($p-n$)-переходов. Она имеет явно диодный характер; соотношение прямого и обратного токов во всем диапазоне напряжений примерно равно 10.

Были также произведены измерения фото-э.д.с. на ($p-n$)-переходе при освещении ультрафиолетовым светом. Время жизни возбужденных светом носителей в наших образцах было примерно 10^{-8} сек. , а следовательно, длина диффузии составляла

всего 5 м . Так как толщина алмазной пластинки больше 100 м , то освещение производилось со стороны ($p-n$)-перехода. Свет от дейтериевой лампы ДДС-250 подавался через монохроматор ДМР-4 и фокусирующую систему на образец. Диафрагма ставилась таким образом, чтобы приконтактные области не освещались. Фото-э.д.с. измерялась на сопротивлении 10^{11} ом , которое было включено последовательно с образцом. Зависимость величины фото-э.д.с. от длины волны света изображена на рис. 3. При длинах волн более 220 м зависимость фото-э.д.с. от длины волны практически совпадает с краем собственного поглощения в алмазе. Уменьшение фотоответа при более коротких длинах волн, вероятно, связано с меньшим временем жизни вблизи легированного слоя.

При принятом способе освещения до длины волны 220 м свет поглощается в нелегированной части кристалла, так как при 220 м коэффициент поглощения в алмазе равен 10^8 см^{-1} (⁶) и часть света, поглощенная в легированном слое, ничтожна. Скорость генерации создаваемых светом носителей убывает с продвижением в глубь кристалла, и поэтому диффузия носителей должна бы быть направлена от ($p-n$)-перехода. Однако в краевом поле ($p-n$)-перехода носители заряда уносятся полем соответственно в n - и p -области за время, меньшее, чем время жизни, и вблизи ($p-n$)-перехода градиент концентрации носителей изменяет знак. Следует считать, что основное число носителей, созданных в полуцилиндре радиуса, равного длине диффузии, втягивается в область ($p-n$)-перехода.

В настоящее время трудно точно определить причину больших обратных токов через ($p-n$)-переход. По указанной схеме нами было легировано три образца, т. е. изготовлено шесть ($p-n$)-переходов. На двух из переходов выпрямление получено не было — вольт-амперная характери-

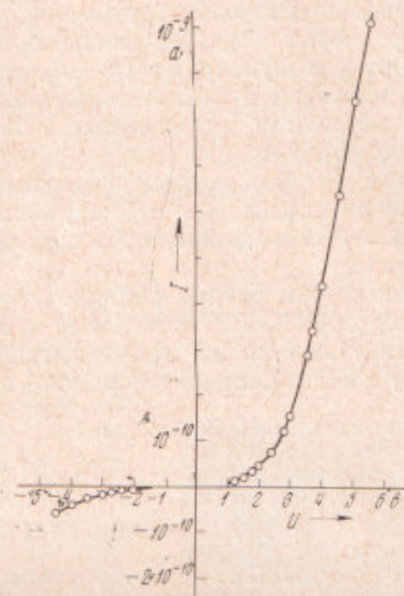


Рис. 2

Рис. 2. Вольт-амперная характеристика ($p-n$)-перехода

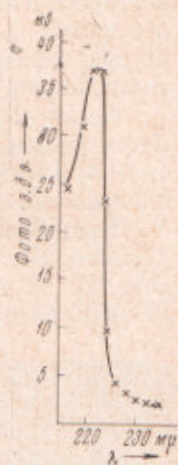


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость фото-э.д.с. ($p-n$)-перехода от длины волны возбуждающего света. Спектральная ширина щели при $\lambda = 220 \text{ м}$ равна 20 \AA

стика имела чисто омический характер. Однако фото-э.д.с. могла быть измерена, и полученные значения даже превышали значения, приведенные на рис. 3. Это указывает на то, что $(p-n)$ -переход сформировался и в этом случае, но зашунтирован внутри кристалла. Возможно, что слои, легированные фосфором, содержат микрообласти, по структуре близкие к графиту, которые и шунтируют $(p-n)$ -переход. Этим также можно объяснить и заниженные значения термо-э.д.с. на образцах с фосфором по сравнению с образцами, легированными бором, но отожженными при температуре 1400°C .

Таким образом, следует считать доказанной принципиальную возможность получения на алмазе $(p-n)$ -перехода. Улучшение характеристик $(p-n)$ -переходов — цель дальнейших исследований в области полного внедрения в алмазе.

В заключение авторы работы считают своим долгом выразить благодарность член-корр. АН СССР Б. М. Вуду за внимание и поддержку в работе, В. М. Гусеву за помощь при проведении опытов по внедрению, Ю. А. Кузнецову и Ю. А. Саликову за помощь при измерениях.

Физический институт им. П. Н. Лебедева
Академии наук СССР
Москва

Поступило
26 II 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ V. S. Vavilov, V. M. Gusev et al., International Conference of Applications of Ion Beams to Semiconductor Technology, Grenoble, 1967, p. 353. ² В. С. Вавилов, М. И. Гусева и др., Физ. и техн. полупроводников, 4, 10 (1970). ³ В. С. Вавилов, М. И. Гусева и др., там же, 4, 17 (1970). ⁴ R. O. Carlson, Transactions of the Metallurgical Soc. of AIME, 245, 483 (1969). ⁵ H. J. Coldsmid, C. C. Jonnes, D. A. Wright, Proc. Phys. Soc., 73, 393 (1969). ⁶ C. D. Clark, P. J. Dean, P. V. Harris, Proc. Roy. Soc., 277, 313 (1964).