

Рис. 2. Зависимости удельного сопротивления ( $1, 1'$ ), концентрации электронов ( $2, 2'$ ) и холловской подвижности ( $3, 3'$ ) от напряжения на полевом электроде (область положительных напряжений на металле).  $1-3$  и  $1'-3'$  соответствуют разным МДП транзисторам.

Были проведены предварительные измерения в квантующих магнитных полях. При  $V_g > 0.3$  В наблюдается сложная осцилляционная зависимость, являющаяся суперпозицией нескольких типов осцилляций от двух или более заполненных размерно-квантованных зон. Наблюдать осцилляции при напряжениях, когда заполнена только одна размерно-квантованная зона, не удалось, так как исследуемые образцы имеют низкую концентрацию нескомпенсированных акцепторов, а в таких материалах вторая размерно-квантованная зона стартует, когда концентрация в первой мала и составляет  $(1-2) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  [3].

Для получения информации об особенностях размерного квантования в узкощелевом  $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  требуются дальнейшие исследования. Авторы выражают благодарность Н. К. Матвеевой за предоставление  $C_7$ -ЦАК.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] В. С. Банников, Н. К. Матвеева, И. В. Мягков, В. Р. Новак, В. В. Ракитин, А. В. Серебренников. Письма ЖТФ. 15, 15 (1989).
- [2] И. В. Гаврилюк, З. И. Казанцева, Н. В. Лаврик, А. В. Набок, Ю. М. Ширшов. Поверхность, вып. 93 (1991).
- [3] В. Ф. Раданцев. ФТП, 22, 1796 (1988).

Редактор Л. В. Шаронова

ФТП, том 26, вып. 12, 1992

## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ИЗОТОПОМ БОР-11

Г. С. Карумидзе, Д. Ш. Джобава, Г. А. Тевзадзе, Ш. Ш. Шавелашвили

Научно-исследовательский институт стабильных изотопов, 380002, Тбилиси, Грузия  
(Получено 28.05.1992. Принято к печати 8.06.1992)

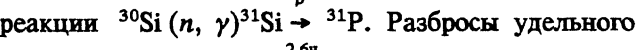
Известно, что изотоп  $^{10}\text{B}$  благодаря большому сечению поглощения нейтронов, протекающего в широком энергетическом интервале согласно

реакции  $^{10}\text{B} (n, \alpha)^7\text{Li}$ , находят широкое применение в атомной науке и технике. Получение изотопа  $^{10}\text{B}$  является достаточно сложным, дорогим и трудоемким технологическим процессом. Между тем в процессе получения изотопа  $^{10}\text{B}$  накапливается и более тяжелый изотоп  $^{11}\text{B}$  [1], который в настоящее время применяется лишь для повышения радиационной стойкости материалов, содержащих бор.

В данной работе рассмотрены некоторые перспективные аспекты применения изотопа  $^{11}\text{B}$ . Известно, что одной из острых проблем в полупроводниковом приборостроении является разработка и создание высокоомного ( $\rho > 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ) кремния  $n$ -типа с малым разбросом удельного электрического сопротивления  $\Delta\rho/\rho \sim 5\%$ , так называемого образцового сопротивления (ОС). В мировой практике отсутствует оптимальная технология получения образцовых сопротивлений кремния  $n$ -типа [2].

В настоящее время наилучшим методом получения кремния с малым разбросом удельного электрического сопротивления является метод нейтронно-трансмутационного легирования (НТЛ) [3]. Однако этот метод не позволяет достигнуть высоких удельных сопротивлений. Для достижения высоких удельных сопротивлений в работе [4] предлагается дополнительно провести облучение кремния  $n$ -типа, полученного методом НТЛ,  $\gamma$ -лучами или быстрыми нейтронами с целью ввода компенсирующих акцепторных центров, которые будут создаваться радиационными дефектами. Однако этому методу присущ ряд принципиальных недостатков. Это, в частности, — возможный отжиг акцепторных центров при достаточно низких температурах [3] и связанное с этим ограничение температурной области, удорожание технологического процесса получения ОС и в случае облучения быстрыми нейтронами в кремнии возникновение радиоактивности в результате пороговых ядерных реакций ( $n, p$ ) и ( $n, \alpha$ ), протекающих в кремнии под воздействием быстрых нейтронов [5].

Вышеуказанные недостатки можно устранить, если использовать в процессе НТЛ в качестве исходного материала кремний  $p$ -типа, легированный изотопом  $^{11}\text{B}$ , являющимся прозрачным для нейтронов. В этом случае компенсация акцепторных уровней будет осуществляться донорной примесью (фосфор), возникающей в результате ядерной реакции



2.6ч

электрического сопротивления (после проведения отжига при  $T \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение  $\sim 1-2$  ч) будут определяться величиной, характерной для процесса НТЛ, так как коэффициент сегрегации бора в кремнии очень высок [6]. Разброс удельного электрического сопротивления  $\Delta\rho/\rho$  может быть уменьшен, если облучение кремния проводить при низких температурах [7]. Величина удельного электрического сопротивления определяется из соотношения  $\rho = 1/n\mu e$ , где  $e$  — заряд электрона,  $\mu$  — подвижность и  $n$  — концентрация носителей заряда. Ее можно легко регулировать путем изменения уровня легирования и времени облучения нейтронами. Она рассчитывается из соотношения

$$N_D - N_p = n, \quad (1)$$

где  $N_D = ^{30}N\Phi\sigma$ ,  $^{30}N$  — количество ядер  $^{30}\text{Si}$  в исходном кремнии,  $\Phi$  — флюенс нейтронов,  $\sigma$  — сечение захвата нейтрона изотопом  $^{30}\text{Si}$ ,  $N_p$  — исходная концентрация изотопа  $^{11}\text{B}$ .

Величина концентрации изотопа  $^{11}\text{B}$  определяется величиной нейтронных потоков ядерной установки, с помощью которой предполагается легирование, и заданной величиной удельного электрического сопротивления.

Предложенным методом также можно получать кремний  $p$ -типа с заданной величиной удельного электрического сопротивления. При этом количество донорной примеси (фосфора), образованной в результате ядерной реакции, должно

быть меньше исходной концентрации изотопа  $^{11}\text{B}$ , и их разность определяет величину удельного электрического сопротивления.

Другим перспективным вариантом применения изотопа  $^{11}\text{B}$  является его использование в твердотельных детекторах нейтронов. Известно, что в некоторых твердотельных детекторах нейтронов в качестве нейтроночувствительного элемента используются изотопы  $^{10}\text{B}$  или  $^{30}\text{Si}$  [8, 9]. Регистрация флюенсов нейтронов в этих детекторах осуществляется с помощью эффекта Холла путем измерения концентрации носителей заряда. В целом такие детекторы имеют некоторые преимущества по сравнению с активационными детекторами. В частности, детекторы на основе кремния могут хранить информацию о флюенсах сколь угодно долгое время, их показания не зависят от режимов работы ядерной установки. Однако им присущ и ряд принципиальных недостатков, в частности, высокий порог чувствительности; в случае использования в качестве детектора кремния, легированного  $^{10}\text{B}$ , — необходимость учета влияния донорных примесей  $\text{Li}$  и  $^{31}\text{P}$ . Указанные недостатки можно устранить, если в качестве детектора использовать кремний, легированный изотопом  $^{11}\text{B}$ . В этом случае регистрация флюенса ( $\Phi$ ) осуществляется путем измерения разностной концентрации носителей заряда методом постоянной Холла:

$$\Phi = \frac{N_c(^{11}\text{B}) - N'_c(^{11}\text{B})}{N_T \sigma}, \quad (2)$$

где  $N_c(^{11}\text{B})$  — концентрация носителей заряда в кремнии до облучения,  $N'_c(^{11}\text{B})$  — концентрация носителей заряда после облучения,  $N_T$  — количество ядер  $^{30}\text{Si}$ ,  $\sigma$  — сечение поглощения нейтронов изотопом  $^{30}\text{Si}$ .

Количество исходной концентрации изотопа  $^{11}\text{B}$  определяется величинами флюенсов, которые необходимо измерить. Описанный детектор нейтронов может стать удобным монитором сопровождения при облучении материалов, а также при измерении флюенса нейтронов в труднодоступных местах ядерных установок.

При использовании изотопа  $^{11}\text{B}$  для изготовления как ОС кремния, так и детектора его содержание должно быть высоким (>99.9%), он не должен содержать металлических примесей, способных активироваться под воздействием нейтронов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] И. Г. Гвердцители, Т. А. Гагуа, Г. Н. Мухелишвили, Ю. В. Николаев, Е. Д. Озиашвили. Тр. III межд. конф. по мирному использованию атомной энергии. Женева (1964).
- [2] В. В. Ботван, Ю. Н. Кузнецов. Зав. лаб., 38, 819 (1972).
- [3] Нейтронное трансмутационное легирование полупроводников (под ред. Дж. Миза), 258, М. (1982).
- [4] В. Н. Глаголь, Г. Л. Колгух. Письма ЖТФ, 13, 465 (1987).
- [5] А. Н. Ерыкалов, Ю. В. Петров. Письма ЖТФ, 11, 1126 (1985).
- [6] Р. Смит. Полупроводники. 380, М. (1962).
- [7] Г. С. Карумидзе, К. Н. Андриевский. ФТП, 21, 862 (1987).
- [8] В. А. Харченко, С. П. Соловьев, Р. В. Новгородцев. Атомная энергия, 28, 253 (1970).
- [9] А. Б. Бахтадзе, Г. С. Карумидзе, П. Д. Кервалишвили, Ш. Ш. Шавелашвили. Атомная энергия, 70, 349 (1991).