

## ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗНЫХ ТИПОВ КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ ЯДЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С БОЛЬШОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ОБЛАСТИ

Р.А. Муминов, С.А. Раджапов, Ё.К. Тошмуродов

Физико-технический институт АН РУз, 100084 Ташкент, Узбекистан; detector@uzsci.net  
(Получена 13.02.2014)

Мақолада бир қанча монокристалл асосида (Чохральский усул, тегилсиз зонли эритиш, кремний нейтронлар билан легирланиб компенсацияланган ва  $\alpha\text{Si(Li)-Si(Li)}$  гетероструктура олинган) сезувчи области қалинлиги ( $W > 2$  мм) ва катта юзали ( $S \geq 60$  см<sup>2</sup>) ядровий нурланишли детекторларни ишлаб чиқиши кўрсатилган. Уларнинг бир қанча электрофизик характеристикалари ҳам кўрсатилган.

В статье рассмотрены особенности разработки детекторов ядерного излучения больших площадей ( $S \geq 60$  см<sup>2</sup>) толщиной чувствительной области  $W > 2$  мм на базе различных монокристаллов кремния (полученных методами Чохральского и бестигельной зонной плавки, кремния, компенсированного нейтронным легированием, а также  $\alpha\text{Si(Li)-Si(Li)}$  гетероструктуры). Показаны особенности их электрофизических характеристик.

In the article, features of developing nuclear radiation detectors of large areas ( $S \geq 60$  cm<sup>2</sup>) and with thickness of sensitive area  $W > 2$  mm are described on the basis of various silicon single crystals (obtained by the Czochralski method and floating zone melting, using silicon compensated by neutron doping, and  $\alpha\text{Si(Li)-Si(Li)}$  heterostructures). The features of their electrophysical characteristics are investigated.

В настоящее время в мировой практике полупроводниковые детекторы (ППД) относительно малых размеров хорошо развиты [1]. В то же время имеется острая необходимость разработки полупроводниковых детекторов больших размеров.

Известно, что основные процессы, происходящие в детекторных структурах при прецизионной регистрации генерированных электронно-дырочных пар, возникающих за счет потери энергии заряда ионизирующих излучений, во многом определяются свойствами исходного кристалла. Эффективность детекторных структур зависит от ряда факторов: в частности, от электрофизических свойств исходного кристалла; диффузионной длины неосновных носителей заряда; характеристик *p-n*-, *p-i-n*-структур, гетероструктур (т.е. механизма протекания тока в условиях функционирования их при обратно смещенных напряжениях); высоты потенциального барьера; ширины области объемного заряда и глубины его залегания; от степени высокоомности и однородности компенсированной чувствительной области полупроводника и т. д.

В работе рассмотрены новые физические и более совершенные технологические процессы, которые специфичны для детекторов больших размеров. Создание таких детекторных структур связано со всесторонним и глубоким пониманием электрофизических свойств исходного кремния большого диаметра и установлением взаимосвязи этих свойств с новыми требованиями технологии получения на их основе высокоэффективных детекторных Si(Li)

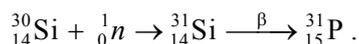
*p-i-n*-структур и  $\alpha$ Si(Li)-Si(Li) гетероструктур, а также *p-n*-структур на основе нейтронно-легированного кремния. Эти научно-технологические данные имеют значение не только для детекторных структур, но и для других типов полупроводниковых приборов больших размеров.

Si(Li) *p-i-n*-структуры и  $\alpha$ Si(Li)-Si(Li) гетероструктуры больших размеров изготовлены из кремния *p*-типа, выращенного методом зонной плавки ( $\rho = 2-3$  кОм·см) и методом Чохральского ( $\rho = 30-50$  Ом·см) по более совершенной кремний-литиевой технологии [1, 2]. В пластины кремния диаметром 110–120 мм и толщиной 5 мм круглой формы проводили диффузию лития на глубину 600 мкм при температуре  $T = 480^\circ\text{C}$ . Дрейф ионов лития осуществляли при температуре  $T = (90-100)^\circ\text{C}$  и напряжении  $U = 600$  В. С целью улучшения параметров Si(Li) *p-i-n*-структур для получения однородно компенсированной во всем объеме чувствительной области был разработан способ дополнительного «выравнивающего» дрейфа при температуре  $T = 60^\circ\text{C}$  и напряжении  $U = (200-300)$  В в течение  $t = (20-35)$  часов. Выравнивающий дрейф способствовал обеспечению сглаживания некачественно компенсированных участков чувствительной области детектора.

По окончании дрейфа лития и формирования Si(Li) *p-i-n*-структуры весь кристалл подвергался специальной химико-технологической обработке в целях получения минимальных обратных токов. Затем методом вакуумного напыления при давлении  $5 \times 10^{-5}$  мм.рт.ст. на тыльную сторону пластины наносили контакты Al (1000 Å), а на чувствительную поверхность ППД контакты Au (~200 Å). Затем готовые детекторы помещали в корпус.

В качестве исходного кремния для нейтронного легирования (НЛК) использовали монокристаллический кремний *p*-типа ( $\rho = 0.7-5$  кОм·см) с высоким временем жизни неосновных носителей заряда, выращенный методом зонной плавки [3].

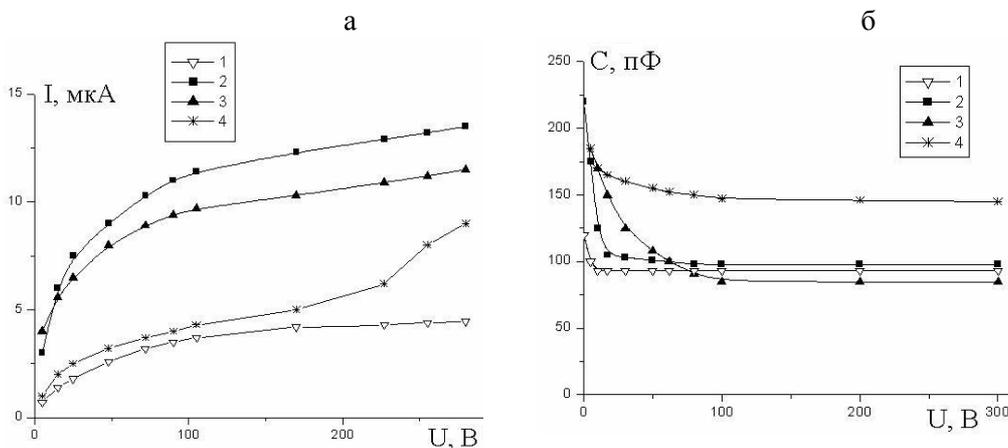
Подготовленные шайбы помещали в кварцевую ампулу и запаивали, чтобы избежать поверхностного загрязнения образцов  $\beta$ -частицами. Далее ампулы с образцами подвергали нейтронному облучению в канале атомного реактора до полной компенсации основных носителей заряда атомами фосфора, наведенного в результате ядерной реакции



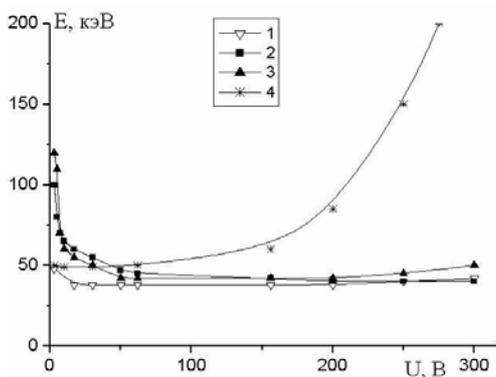
Концентрацию фосфора можно рассчитать по формуле  $N_p = 1.7 \times 10^{-4} \phi t$ , где  $\phi$  – интенсивность медленных нейтронов,  $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ,  $t$  – время облучения, с.

Для отжига радиационных дефектов облученные пластины помещали в кварцевую ампулу и загружали в рабочую зону печи при температуре 800–900°C на 3 часа, затем печь выключали, и пластины остывали вместе с печью. После проведения нейтронной компенсации кремния весь кристалл подвергали химико-технологической обработке по специальной методике для обеспечения минимальных толщин «мертвых» слоев входного окна и обратного тока утечки для минимизации шумовых характеристик детектора. Затем на нейтронно-легированный кристалл кремния методом вакуумного напыления наносили контакты Al (1000 Å) и Au (~200 Å) и следом проводили низкотемпературный отжиг при температуре  $T = 140-160^\circ\text{C}$  в течение  $t = 25-60$  часов. Таким образом была сформирована детекторная структура, которая помещалась в корпус, и проводили контрольные измерения электрофизических характеристик при комнатной температуре.

На рис. 1, 2 приведены электрофизические характеристики всех типов детекторов ядерного излучения с большой площадью чувствительной области.



**Рис. 1.** Вольтамперные (а) и вольтфарадные (б) характеристики: Si(Li) *p-i-n*-детекторов на исходном Si, полученных методом Чохральского (1) и бестигельной зонной плавкой (2); детекторов на основе  $\alpha$ Si(Li)-Si(Li) гетероструктур (3) и на базе нейтронно-легированного (компенсированного) кремния (4).



**Рис. 2.** Вольтшумовые характеристики: Si(Li) *p-i-n*-детекторов на исходном Si, полученных методом Чохральского (1) и бестигельной зонной плавкой (2); детекторов на основе  $\alpha$ Si(Li)-Si(Li) гетероструктур (3) и на базе нейтронно-легированного (компенсированного) кремния (4).

Для выяснения взаимосвязи величины обратных токов детекторов и физических характеристик исходного полупроводникового материала рассмотрим вольтамперную характеристику Si(Li) *p-i-n*-структуры при обратном смещении [2, 4]:

$$I = q \left\{ n_p \frac{L_n}{\tau_n} + p_n \frac{L_p}{\tau_p} + 2n_i \frac{L_i}{\tau_i} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{W_i}{L_i}\right) \right] \right\} \left[ \exp\left(-\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

где  $n_p$  – концентрация электронов в *p*-области;  $p_n$  – концентрация дырок в *n*-области;  $n_i$  – собственная концентрация носителей;  $L_n, L_p, L_i$  – диффузионная длина носителей в *n*-, *p*- и *i*-области соответственно ( $L = \sqrt{D\tau}$ ,  $D$  – коэффициент диффузии);  $\tau_n, \tau_p, \tau_i$  – время жизни основных носителей в соответствующих областях;  $U$  – величина напряжения обратного смещения;  $W_i$  – толщина компенсированной *i*-области.

В общем случае обратный ток  $p-i-n$ -структуры можно рассматривать как сумму двух токов:

$$I_0 = I^v + I^s, \quad (2)$$

где  $I^v$  – объемный, а  $I^s$  – поверхностный компоненты.

Из сравнительного анализа (см. рис. 1а) следует, что характер ВАХ всех типов детекторов практически одинаков. Однако величина тока, текущего в обратно смещенной Si(Li)  $p-i-n$ - структуре (2 и 3 типы детекторов), в среднем по обратному току почти в 2 раза отличается по сравнению с детекторами 1 и 4 типов. Это объясняется наличием поверхностного компонента тока и формированием инверсионного слоя на поверхности этих детекторов. Это свойственно детекторам, изготовленным из высокоомного кремния, полученным как методом Чохральского, так и бестигельной зонной плавкой.

Из вольтемкостных характеристик детекторов (рис. 1б) видно, что наилучшие характеристики наблюдаются у детекторов, выращенных методом Чохральского и бестигельной зонной плавкой. Отличие детекторов на основе гетероструктур и нейтронно-легированного кремния связано с недостаточной компенсацией чувствительной области детекторов, т.е. обусловлено наличием локальных неоднородностей в объеме исходного материала. Использование специальных «мягких» режимов дрейфа ионов лития, а также замена химически осажденного никелевого тыльного контакта на напыленный слой алюминия с применением дополнительного выравнивающего дрейфа позволяют уменьшить величину напряжения смещения, при которой достигается максимально необходимая толщина чувствительной области.

Вольтшумовые характеристики детекторов на основе  $p-i-n$ -структур и гетероструктур имеют протяженное плато, т.е. широкий диапазон рабочих напряжений, где уровень шума существенно не изменяется. Однако для детекторов, изготовленных из нейтронно-легированного кремния, свойственен рост уровня шума при повышении напряжения. В основном это связано с омическим контактом тыльной стороны детектора.

Таким образом, на основе учета особенностей методов получения исходного монокристаллического кремния, а также способов формирования на его основе соответствующих детекторных структур больших площадей и толщин чувствительной области показаны возможности по обеспечению высокой эффективности их электрофизических и шумовых характеристик.

## ЛИТЕРАТУРА

1. С.А. Азимов, Р.А. Муминов, С.Х. Шамирзаев, А.Я. Яфасов. Кремний-литиевые детекторы ядерного излучения (Ташкент, Фан, 1981).
2. С.А. Раджапов. Особенности физических процессов формирования кремний-литиевого детектора ядерного излучения с большой чувствительной областью (автореф. докт. дис., Ташкент, 2010).
3. А.К. Рафиков, Р.А. Муминов, С.А. Раджапов, Ш.А. Махмудов, М. Каримов. В материалах Международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», посвященной 70-летию Физико-технического института АН РУз (Ташкент, 14-15 ноября 2013), с.14-15.
4. В.С. Васильев, Препринт ОИЯИ Р-2888 (Дубна, 1966).