

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МОДУЛЯЦИИ БАЗОВОЙ ОБЛАСТИ КРЕМНИЕВОЙ p^+p-n^+ -СТРУКТУРЫ

Д.М. Ёдгорова, А.В. Каримов, А.А. Каримов

Физико-технический институт НПО “Физика-Солнце” АН РУз (Ташкент)
Узбекистан

Поступила в редакцию 20.03.2013

Проведены исследования зависимости емкости кремниевых p^+p-n^+ -структур от запирающего напряжения. Экспериментально показано, что в двухсторонне-диффузионных структурах вольт-емкостные характеристики подчиняются кубическому закону за счет линейного распределения примесей в базовой области, при этом приращения емкости от запирающего напряжения имеют постоянную величину. В диффузионно-эпитаксиальных структурах наблюдается резкое снижение емкости в интервале напряжений от 0 до 5 вольт, что четко проявляется в зависимости динамической емкости от запирающего напряжения. Наблюдаемые зависимости объясняются равномерной модуляцией базовой области в двухсторонне-диффузионной структуре и сильной модуляцией базы в диффузионно-эпитаксиальной структуре за счет образования $p^+p^0-n^+$ - и $p^+p^0-i-n^+$ -структур в технологических процессах получения $p-n$ -перехода.

Ключевые слова: кремниевая p^+p-n^+ -структура; процесс модуляции базы; зависимость емкости от напряжения; двухсторонне-диффузионная $p^+p^0-n^+$ -структура; диффузионно-эпитаксиальная $p^+p^0-i-n^+$ - структура.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ МОДУЛЯЦІЇ БАЗОВОЇ ОБЛАСТІ КРЕМНІЄВОЇ p^+p-n^+ -СТРУКТУРИ

Д.М. Ёдгорова, А.В. Каримов, А.А. Каримов

Проведено дослідження залежності ємності кремнієвих p^+p-n^+ -структур від замикаючої напруги. Експериментально показано, що у двосторонньо-дифузійних структурах вольтемнісні характеристики відповідають кубічному закону за рахунок лінійного розподілу домішок у базовій області, при цьому прирощення ємності від замикаючої напруги мають постійну величину. У дифузійно-епітаксиальних структурах спостерігається різке зниження ємності в інтервалі напруг від 0 до 5 вольтів, що чітко проявляється в залежності динамічної ємності від замикаючої напруги. Залежності, які спостерігаються пояснюються рівномірною модуляцією базової області у двосторонньо-дифузійній структурі та сильній модуляції бази в дифузійно-епітаксиальній структурі за рахунок утворення $p^+p^0-n^+$ - і $p^+p^0-i-n^+$ -структур у технологічних процесах одержання $p-n$ -переходу.

Ключові слова: кремнієва p^+p-n^+ -структура; процес модуляції бази; залежність ємності від напруги; двосторонньо-дифузійна $p^+p^0-n^+$ -структура; дифузійно-епітаксиальна $p^+p^0-i-n^+$ -структура.

RESEARCH OF MODULATION BASE REGION PROCESSES IN p^+p-n^+ -SILICON STRUCTURE

D.M. Yodgorova, A.V. Karimov, A.A. Karimov

The research of depends of p^+p-n^+ -silicon structures volume on locked voltage. Experimentally shown that in two-way-diffusion structures volt-ampere characteristics accept to cubic law by linear distribution of impurities in the base. The increments of capacity from locked voltage are constant. In the diffusion-epitaxial structures a sharp decline in the capacity range of voltages from 0 to 5 volts, which is clearly manifested in the dependence of the dynamic capacity of the locked voltage. The observed depends are explained by the uniform modulation of the base region in a two-sided-diffusion structure and strong modulation of the base in the diffusion-epitaxial structure by forming $p^+p^0-n^+$ - and $p^+p^0-i-n^+$ -structures in technological processes of $p-n$ -junction.

Keywords: p^+p-n^+ -silicon structure; modulation of base process; capacity depends on voltage; $p^+p^0-n^+$ -two-site-diffusion structure; $p^+p^0-i-n^+$ -diffusion-epitaxial structure.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время $p-i-n$ -диоды стали широко использоваться в ВЧ и СВЧ диапазонах для

управления уровнем и фазой СВЧ сигналов, коммутации высокочастотной и сверхвысокочастотной мощности в линиях передач, для

защиты радиотехнической аппаратуры от случайных высокочастотных импульсов, для стабилизации СВЧ мощности, а также в аттенуаторах высокочастотного диапазона. Практически $p-i-n$ -диоды оказываются вне конкуренции, а из-за фактической невозможности их совмещения на чипе с другими элементами не вытесняются и интегральными схемами [1]. В частности, $p-i-n$ -диоды в которых в режиме запираания удельная емкость очень мала и не зависит от напряжения смещения (параметров управляющего сигнала) представляют интерес для использования в модуляторах. В них колебания мощности падающего СВЧ сигнала и температуры не приводят к значительным изменениям характеристик модулятора. В случае, когда емкость $p-i-n$ -диода существенно меняется от рабочего напряжения, она представляет интерес как варакторный диод для управления резонансной частотой генераторов [2]. Варакторные диоды, так называемые варикапы, находят широкое применение в различных устройствах, где используется их главное свойство – возможность безынерционного изменения и модуляции барьерной емкости [3].

В $p-i-n$ -диодах в зависимости от технологии получения сильнолегированных областей профиль распределения примесей у границы выпрямляющего перехода может приобрести различный характер. Переход может быть плавным, резким или сверхрезким и т.д. [4], что определяется профилем распределения примеси в базовой области. Для получения заданного распределения примесей можно привлечь метод молекулярно-лучевой эпитаксии в сочетании с ионной имплантацией [5]. Однако такая технология является сложной и дорогостоящей. По предварительным данным [6, 7] используя модифицированную диффузионную технологию или методы эпитаксиального роста и диффузии в едином процессе можно получать структуры с необходимым набором распределения примесей по толщине базовой области.

В настоящей работе приводятся результаты исследования процессов модуляции базовой области кремниевых p^+p-n^+ -структур полученных двухсторонне-диффузионной и диффузионно-эпитаксиальной технологиями.

ПОЛУЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СТРУКТУР

В исследуемых структурах в качестве базовой области использован монокристаллический кремний p -типа проводимости с удельным сопротивлением 1.5 кОм·см толщиной 500 мкм для диффузионных структур и 300 мкм для диффузионно-эпитаксиальных. Диффузионные структуры получены одновременной диффузией бора и фосфора на каждую из поверхностей базового кремния на глубину 5 – 10 мкм при 1100 °С в течение 3 часов. Диффузионно-эпитаксиальные структуры получены диффузией бора на одну поверхность p -кремния при 1100 °С, а затем выращиванием при 1180 °С на другую поверхность подложки эпитаксиального слоя n^+ -типа толщиной ~10 мкм легированного фосфором.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно из рис. 1а в зависимости от технологии получения структуры его емкостные характеристики ведут себя по-разному. В двух-

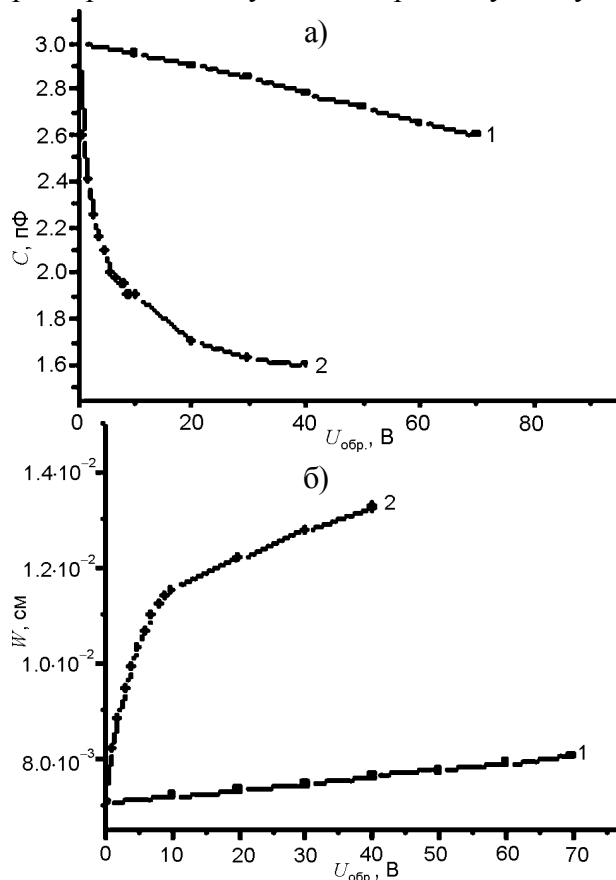


Рис. 1. Зависимости емкости (а) и (б) толщины слоя объемного заряда от напряжения в p^+p-n^+ -структуре: 1 – двухсторонне-диффузионная p^+p-n^+ -структура; 2 – диффузионно-эпитаксиальная p^+p-n^+ -структура.

сторонне-диффузионной p^+p-n^+ -структуре (кривая 1) изменение емкости от запирающего напряжения носит монотонный характер и при малых смещениях относительное изменение удельной емкости (пФ/см²) незначительно. Аналогично изменение толщины слоя объемного заряда от запирающего напряжения носит линейный характер и увеличивается с малым шагом, что соответствует плавным переходам и в координатах $U \sim C^{1/3}$ создает сменяющие друг друга два линейных участка, что можно объяснить различием соответствующих концентраций носителей до и после 30 вольт.

Относительно диффузионно-эпитаксиальной p^+p-n^+ -структуры можно отметить, что его емкость при малом напряжении (1 В, кривая 2) резко уменьшается. Далее она постепенно нелинейно уменьшается до достижения 10 В и затем процесс снижения замедляется. Начиная с 10 вольт, как емкости, так и обедненные слои от запирающего напряжения становятся практически неизменными, что характерно варикапным структурам [3]. Для четкого представления динамики изменения емкости от напряжения введем понятие “динамической емкости” чувствительности, которую можно выразить формулой

$$s_U = \frac{C_2 - C_1}{U_2 - U_1} \text{ пФ/В.} \quad (1)$$

Рассчитанная по формуле (1) зависимость чувствительности от рабочего напряжения приведена на рис. 2. Видно, что участок эффективной модуляции емкости расположен в области напряжений 0 ÷ 5 вольт.

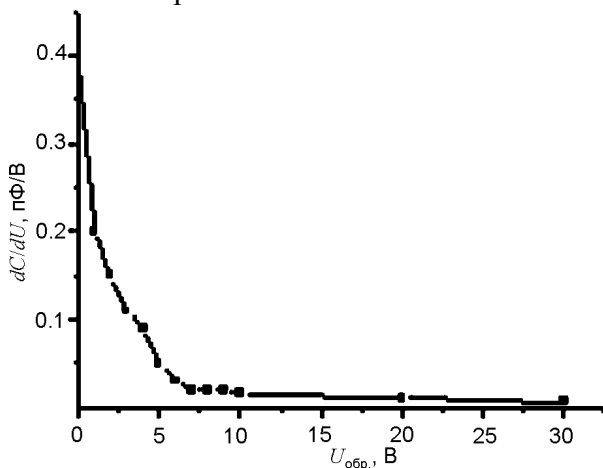


Рис. 2. Зависимости динамической емкости от запирающего напряжения.

Наблюдаемое поведение вольтемкостных характеристик можно объяснить диффузионными процессами происходящими в процессе формирования эпитаксиального выпрямляющего $p-n^+$ -перехода. Так как при диффузии бора к кремнию p -типа на поверхности до глубины порядка 10 мкм создается сильнолегированный слой p^+ -типа, то создаваемый на границе p^+-p -перехода профиль распределения примесей бора практически не влияет на свойства $p-n^+$ -перехода. Однако в последующем этапе роста легированного фосфором эпитаксиального слоя при температуре 1180 °С возможно обеднение базовой области за счет испарения легирующей примеси бора из базы [6] и внедрение фосфора приводящего к частичной компенсации приграничного с эпитаксиальным слоем участка. В результате возможно образование i -слоя, который при малых напряжениях порядка 1 В сразу охватывается объемным зарядом (до 11 мкм) и приводит к резкому снижению емкости эпитаксиально-диффузионной p^+p-n^+ -структуры, рис. 3, а процесс модуляции продолжается до 10 вольт, затем как изменение емкости (рис. 2) также изменение толщины объемного заряда прекращается.

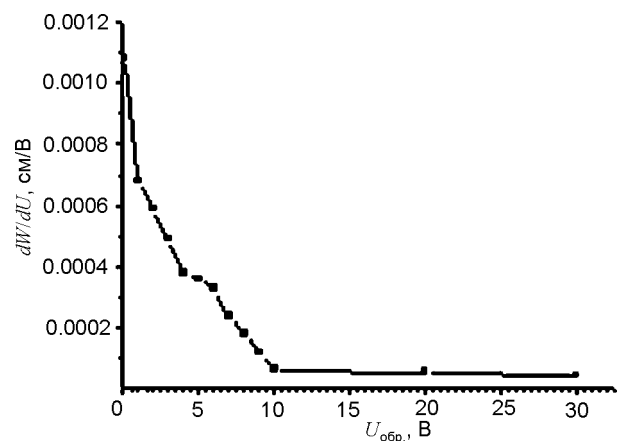


Рис. 3. Зависимости модулируемой толщины от запирающего напряжения в диффузионно-эпитаксиальной структуре.

На основе данных зависимости емкости от напряжения с помощью формул (2) и (3) был определен профиль распределения концентрации носителей у границы $p-n^+$ -перехода [8]:

$$d_x = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{C(U)}; \quad (2)$$

$$N_{dx} = \frac{2}{\epsilon\epsilon_0 q S^2} \frac{dU}{d(1/C^2)} \quad (3)$$

Оказалось, что действительно концентрация носителей в базе до глубины 0.011 см имеет низкие значения $1.5 \div 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ и далее увеличивается в три раза, приближаясь к величине исходной концентрации базовой области, рис. 4.

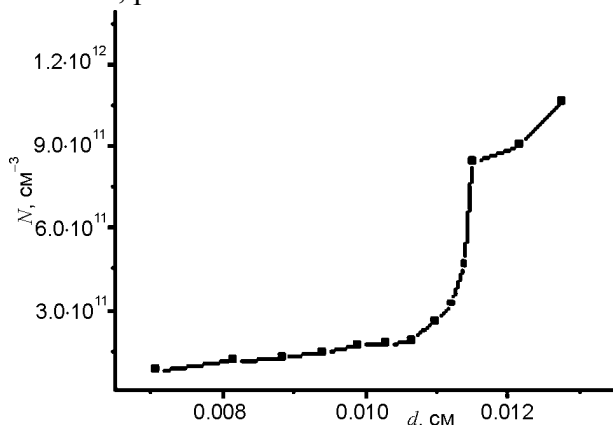


Рис. 4. Данные распределения концентрации носителей от границы $p-n$ -перехода.

В соответствие с полученными данными по зависимости емкости и обедненного слоя p^0-n^+ -перехода от запирающего напряжения были построены качественные энергетические зонные диаграммы двухсторонне-диффузионных и диффузионно-эпитаксиальных $p^+p^-n^+$ -структур. Реально после технологических операций получают $p^+p^0-n^+$ - и $p^+p^0-i-n^+$ -структуры (рис. 5), которые могут быть использованы для высокочастотных модуляторов и генераторов соответственно.

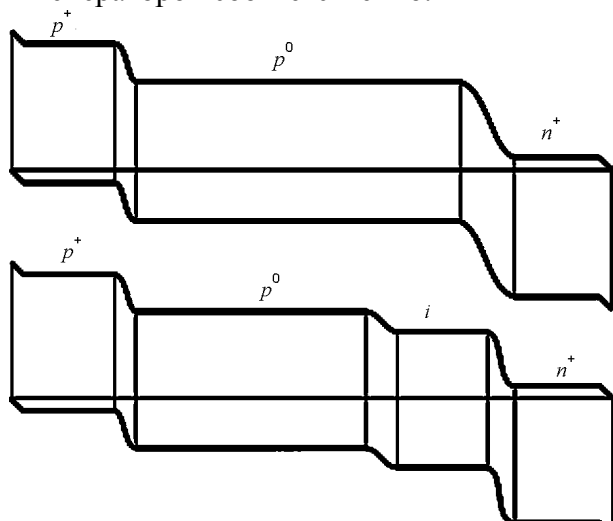


Рис. 5. Энергетические зонные диаграммы двухсторонне-диффузионной и диффузионно-эпитаксиальной $p^+p^-n^+$ -структуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально показано, что в $p^+p^-n^+$ -структурах можно управлять профилем распределения примесей в базовой области и обеспечить неизменные значения емкости либо их резкую зависимость от запирающего напряжения за счет совмещения диффузионной и эпитаксиальной технологий получения $p-n$ -перехода, что является дополнительным инструментом управления параметрами базовой области $p-i-n$ -структур. Введено понятие “динамической емкости” которое позволяет определить глубину модуляции базовой области $p-n$ -перехода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Резников В., Губырин Л. Высокочастотные и СВЧ $p-i-n$ -диоды. <http://rf.atnn.ru/s6/pin-diod.htm>.
2. Лебедев И.В., Поляков М.Ю. Частотные свойства ступенчатых варакторных структур//Радиотехника и электроника. – 2001. – Т. 46, № 4. – С. 498-503.
3. Степанов Б. Особенности применения варикапов. http://www.radioradar.net/hand_book/documentation/varikap.html
4. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. Часть 1. – М.: Мир. – С. 123-125.
5. Соловьев В.А., Головяшкин А.Н. Варикап на основе сверхрезкого-перехода//Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2001. – № 1. – С. 28-30.
6. Башмаков А.В., Овчаров В.В. Моделирование процесса удаления примесей из полупроводниковых пластин в неоднородном температурном поле//Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30, Вып. 5. – С. 54-59.
7. Патент РУз №IAP03930. Устройство для получения диффузионных и эпитаксиальных слоев полупроводниковых соединений A^3B^3 // Официальный бюллетень. – 2009. – № 5.
8. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы/ Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.

LITERATURA

1. Reznikov V., Gubyrin L. Vysokochastotnye i SVCh $p-i-n$ -diody. <http://rf.atnn.ru/s6/pin-diod.htm>.
2. Lebedev I.V., Polyakov M.Yu. Chastotnye svoystva stupenchatyh varaktornyh struktur//Radio-tehnika i elektronika. – 2001. – Т. 46, № 4. – С. 498-503.

3. Stepanov B. Osobnosti primeneniya varikapov. http://www.radoradar.net/hand_book/documentation/varikap.html
4. Zi S.M. Fizika poluprovodnikovyh priborov. Chast' 1. – M.: Mir. – S. 123-125.
5. Solov'ev V.A., Golovyashkin A.N. Varikap na osnove sverhrezkogo-perehoda//Tehnologiya i konstruirovaniye v 'elektronnoj apparature. – 2001. – № 1. – S. 28-30.
6. Bashmakov A.V., Ovcharov V.V. Modelirovaniye processa udaleniya primesej iz poluprovodnikovyh plastin v neodnorodnom temperaturnom pole//Pis'ma v ZhTF. – 2004. – T. 30, Vyp. 5. – S. 54-59.
7. Patent RUz №IAP03930. Ustrojstvo dlya polucheniya diffuzionnyh i 'epitaksial'nyh sloev poluprovodnikovyh soedinenij A³B⁵//Oficial'nyj byulleten'. – 2009. – № 5.
8. Farenbruh A., B'yub R. Solnechnye 'elementy/Per. s angl. – M.: 'Energoatomizdat, 1987. – 280 s.