

06;11;12

©1993

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ПОЛУПРОВОДНИК-ЗАЗОР-ПОЛУПРОВОДНИК

В.М.Арутюнян, Х.В.Неркарарян

С целью изготовления полупроводниковых лазеров с составным резонатором была разработана технология, позволяющая с помощью скола создавать структуру из двух полупроводниковых кристаллов, которые отдалены друг от друга на расстояние меньше или порядка микрона [1]. При этом лицевые поверхности расположенных друг против друга кристаллов представляют собой кристаллографические плоскости. Незначительным изменением этой технологии нам удалось полностью изолировать друг от друга полупроводниковые кристаллы, создав тем самым плоский конденсатор с полупроводниковыми обкладками. В настоящей работе обсуждаются ряд особенностей указанной структуры, которые позволяют предложить использовать технику скола для создания новых полупроводниковых приборов.

Важная особенность предлагаемого конденсатора состоит в том, что благодаря малому зазору значение его емкости определяется также физическими параметрами полупроводниковых обкладок. Обозначим через ε_n и L соответственно значение диэлектрической проницаемости и дебаевской длины экранирования (либо толщины обедненного слоя) полупроводникового кристалла и через ε_g и d значения диэлектрической проницаемости материала, заполняющего зазор и его толщину. При условии $\varepsilon_n/L \lesssim \varepsilon_g/d$ емкость конденсатора существенно зависит от параметров полупроводника. Это условие легко реализуется для широкого класса полупроводниковых материалов и различных заполняющих зазор сред.

В ряде случаев протекающие в структуре полупроводник-зазор-полупроводник (ПЗП) физические процессы принципиально не отличаются от аналогичных процессов протекающих в МДП структуре. В обеих структурах с помощью приложенного напряжения можно управлять их емкостью. Однако существенное преимущество ПЗП структуры заключается в возможности использования в качестве изолирующей среды самых разнообразных материалов в различных фазовых состояниях. В частности, если зазор между полупроводниками заполнить материалом с очень большим значением диэлектрической проницаемости, то

определяемое соотношением ϵ_g/d верхнее предельное значение емкости ПЗП структуры может значительно превысить аналогичное значение МДП структуры. В качестве такого материала могут быть предложены растворимые в воде сегнетоэлектрики (например, сегнетова соль), которыми легко можно заполнить зазор. Заметим, что использование материалов с большим значением диэлектрической проницаемости в МДП технологии крайне проблематично. В этом преимуществе ПЗП структуры можно убедиться с помощью следующего численного примера. Обычно в роли диэлектрика в МДП структуре выступает SiO_2 с $\epsilon_g = 4$ и $d = 50$ нм. Если в ПЗП структуре зазор заполнен материалом с $\epsilon_g = 10^3$, то даже при значительно большей толщине зазора ($d = 1$ мкм) верхнее предельное значение управляемой дифференциальной емкости предлагаемой ПЗП структуры на порядок превысит типичное значение МДП структуры. Что же касается нижнего предельного значения емкости, то в обеих структурах она одинакова и определяется максимальным значением ширины обедненного слоя. Указанные простота изготовления и возможности варьирования величины емкости в более широких пределах имеют принципиальное значение для создания на основе ПЗП структуры параметрических генераторов и усилителей электромагнитных колебаний.

Емкостью ПЗП структуры можно управлять также с помощью светового излучения. Поглощенная в поверхностной области полупроводниковых обкладок световая волна изменит дебаевскую длину экранирования, в результате чего изменится также емкость структуры. Это явление наиболее четко проявится в собственных полупроводниках. Понятно, что ПЗП структуру можно использовать также в качестве оптического детектора. Учитывая конструктивные особенности ПЗП структуры, созданный на ее основе детектор излучения может быть особенно эффективен в волоконно-оптических системах связи. При этом микронная толщина зазора обеспечивает квазиволноводный режим распространения излучения, а возможность его заполнения материалом с большим ϵ_g существенно увеличивает чувствительность детектора.

Рассмотрим теперь роль поверхностных состояний на протекающие в ПЗП структурах процессы. Наличие заряда на поверхностных состояниях полупроводников может привести к возникновению принципиально новой ситуации. Пусть к обкладкам конденсатора приложено напряжение φ , а eN — плотность отрицательного заряда на поверхностных состояниях полупроводниковых обкладок, зависимостью которой от φ можно пренебречь. Стандартным образом решая уравнение Пуассона и сшивая поля на гра-

ницах раздела, получим следующую систему уравнений:

$$\pm \frac{\varepsilon_n}{L_i} F(Y_{s-}) - \frac{e^2 N}{kT} = \frac{\varepsilon_g}{d} \left[\frac{e\varphi}{kT} + Y_{s-} - Y_{s+} \right], \quad (1)$$

$$\pm \frac{\varepsilon_n}{L_i} F(Y_{s+}) - \frac{e^2 N}{kT} = -\frac{\varepsilon_g}{d} \left[\frac{e\varphi}{kT} + Y_{s-} - Y_{s+} \right], \quad (2)$$

где

$$F(Y) = [\lambda (e^{-Y} - 1) + \lambda^{-1} (e^Y - 1) + (\lambda - \lambda^{-1}) Y]^{1/2}, \quad (3)$$

$$Y_{s-} = \frac{e(2\varphi_{s-} - \varphi)}{2kT}, \quad Y_{s+} = \frac{e(2\varphi_{s+} + \varphi)}{2kT},$$

$$L_i^2 = \frac{\varepsilon_n kT}{8\pi e^2 n_i}, \quad \lambda = \frac{P_0}{n_i} = \frac{n_i}{n_0}.$$

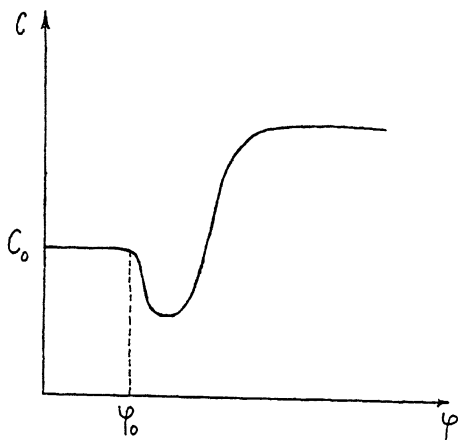
Здесь φ_{s-} и φ_{s+} — значения потенциала в плоскостях раздела между полупроводниками и зазором, n_0 и P_0 — равновесные концентрации электронов и дырок в невырожденном полупроводнике, n_i и L_i — концентрация носителей и длина экранирования в собственном полупроводнике, T — температура, k — постоянная Больцмана, e — заряд электрона. Знак плюс в (1) и (2) описывает случай искривления зон вверх, а знак минус — вниз. Значение дифференциальной емкости в ПЗП структуре определится выражением

$$C = S \frac{\partial Q_s}{\partial \varphi}, \quad Q_s = \frac{\varepsilon_g}{4\pi d} \left[\varphi + \frac{kT}{e} (Y_{s-} - Y_{s+}) \right], \quad (4)$$

где S — поперечная сколу площадь полупроводниковых обкладок.

Рассмотрим случай, когда ПЗП структура образована из полупроводника n -типа. Тогда из-за наличия отрицательного заряда на поверхностных состояниях в приповерхностных областях полупроводниковых обкладок возможно образование обедненных слоев. Приложенное напряжение уменьшает толщину обедненного слоя в одной из полупроводниковых обкладок и увеличивает в другой. При этом специфичность ситуации заключается в том, что, как показали расчеты, сумма толщин обедненных слоев обеих полупроводниковых не меняется, пока один из этих слоев не исчезнет. Иными словами, в области приложенного напряжения $\varphi < \varphi_0$ емкость ПЗП структуры остается постоянной и определяется формулой

$$C_0 = \frac{S}{4\pi} \left[\frac{d}{\varepsilon_g} + 4 \left(\frac{L_i}{\varepsilon_n} \right)^2 \lambda \frac{e^2 N}{kT} \right]^{-1}, \quad \varphi_0 = \frac{eNS}{4\pi C_0}. \quad (5)$$



В области же $\varphi > \varphi_0$ емкость структуры существенно зависит от приложенного напряжения. С возрастанием φ вначале она убывает, а затем в связи с формированием инверсного слоя емкость возрастает, доходя до предельного значения. На рисунке схематически представлена зависимость емкости ПЗП структуры от приложенного напряжения. Из (5) следует, что определив емкость ПЗП структуры, а также ту область, где емкость постоянна, можно найти значение плотности заряда на поверхностных состояниях полупро водников.

Если в качестве полупроводниковых обкладок выступает кристалл кремния с $n_0 = 1.45 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, то для $d = 1 \text{ мкм}$ и $\epsilon_g = 1$ нетрудно убедиться, что в области $N \geq 10^{11} \text{ см}^{-2}$ определяемое формулой (5) значение емкости ПЗП структуры существенно зависит от N . Указанное обстоятельство, в частности, позволяет обнаружить наличие газа, атомы которого адсорбируются поверхностью полупроводника и реализовать на базе ПЗП структуры емкостные газовые сенсоры. Подобрав для размещения в зазоре соответствующую мембрану, можно обнаружить также различные ионы. В зависимости от активности мембраны и величины заряда ионов могут быть созданы различные ион-селективные, ион-чувствительные ПЗП структуры, био и иммуносенсоры на их основе [2]. Разумеется, в этих применениях необходимо предотвратить развитие необратимых процессов из-за коррозии (в том числе фотокоррозии), необратимой хемосорбции и т.д. [3,4]. На ПЗП структурах возможна реализация различных тензо-, магнитно-, радиационных и других сенсоров — всего комплекса чувствительных к изменениям емкости, концентрации носителей и температуры приборов.

Список литературы

- [1] *Тсанг У.* В кн.: Полупроводниковые инжекционные лазеры. Москва, 1990. С. 213-320.
- [2] *Арутюнян В.М.* // Микроэлектроника. 1991. Т. 20. В. 4. С. 337-355.
- [3] *Арутюнян В.М.* В сб.: Фотоприемники и фотопреобразователи / Под ред. Ж.И.Алферова и Ю.В.Шмарцева. Л. 1986. С. 253-287.
- [4] *Арутюнян В.М.* // УФН. 1989. Т. 158. В. 2. С. 255-291.

Ереванский государственный
университет

Поступило в Редакцию
27 мая 1993 г.
