

ФИЗИКА

УДК 537.311.33

Член-корреспондент НАН Армении Г. М. Рутцман, Х. В. Терсизьян

Свойства и возможности применения структуры
полупроводник — зазор — полупроводник

(Представлено 15/IV 1993)

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

Существенное преимущество рассматриваемого конденсатора по сравнению с другими аналогичными (например, МДП-структуры) заключается в возможности использования в качестве изолирующей среды самых разнообразных материалов в различных фазовых состояниях. Можно предложить разместить в зазоре между плоскопараллельными полупроводниковыми обкладками газ, находящийся в твердом или жидком состоянии, диэлектрик, электролит, сегнетоэлектрик, стекло и другие материалы, которые существенным образом могут влиять на емкостные характеристики структуры.

Другая важная особенность предлагаемого конденсатора состоит в том, что благодаря малому зазору значение его емкости определяется также физическими параметрами полупроводниковых обкладок. Обозначим через ϵ_1 и L_1 соответственно, диэлектрическую проницаемость и характерную длину полупроводникового кристалла (дебавской длины экранирования либо толщины обедненного слоя) и через ϵ_2 и L_2 диэлектрическую проницаемость материала, заполняющего зазор, и его толщину. При условии $\epsilon_1 L_1 \leq \epsilon_2 L_2$ емкость конденсатора существенно зависит от параметров полупроводника. Это условие лег-

ко реализуется для широкого класса полупроводниковых материалов и различных заполняющих зазор сред, в том числе в случае воздушного промежутка.

Наконец, отметим еще одно свойство исследуемой структуры — возможность создания сильных электрических полей в зазоре между полупроводниковыми обкладками. В условиях, когда падение напряжения между полупроводниковыми обкладками составляет несколько десятков вольт, легко обеспечить напряженность электрического поля в зазоре порядка сотен кВ/см и выше. Указанное обстоятельство позволяет исследовать различные нелинейные свойства заполняющего зазора среды, размерные эффекты, а также различные эффекты сильного поля.

Вначале рассмотрим возможности использования структуры полупроводник—зазор—полупроводник (ПЗП-структуры) в качестве конденсатора, емкость которого меняется в зависимости от приложенного напряжения (новый тип вариконда). Заметим, что технологические особенности позволяют создавать структуру с полностью идентичными полупроводниковыми обкладками. Процедура вычисления емкости ПЗП-структуры достаточно стандартна, и здесь мы на этом не будем останавливаться. Рассмотрим ряд частных случаев, которые позволяют судить об изменении емкости структуры C в условиях изменения приложенного напряжения φ . Пусть оно еще настолько мало, что приводит лишь к небольшому изменению концентрации носителей зарядов в приповерхностном слое полупроводниковых обкладок. Тогда для дифференциальной емкости ПЗП-структуры нетрудно получить следующее выражение:

$$C = \frac{S}{4\pi} \left[\frac{d}{\epsilon_d} + \left(\frac{8}{\lambda + \lambda^{-1}} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{L_i}{\epsilon_n} \right]^{-1}, \quad (1)$$

$$L_i^2 = \frac{\epsilon_n kT}{8\pi e^2 n_i}, \quad \lambda = \frac{p_0}{n_i} = \frac{n_i}{n_0}.$$

Здесь S — поперечная сколу площадь полупроводниковых обкладок, n_0 и p_0 — равновесные концентрации электронов и дырок в исследуемом невырожденном полупроводнике, n_i и L_i — концентрация носителей и длина экранирования в собственном полупроводнике, T — температура, k — постоянная Больцмана, e — заряд электрона. Формула (1) имеет место, когда

$$\frac{e\varphi}{kT} \left[1 + \left(\frac{\lambda + \lambda^{-1}}{8} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\epsilon_n d}{\epsilon_d L_i} \right]^{-1} \ll 1. \quad (2)$$

Формула (1) достаточно универсальна и носит общий характер, поскольку она применима для любого типа невырожденного полупроводника в случае слабых приложенных напряжений. Однако с ростом напряжения, когда уже в одной из полупроводниковых обкладок воз-

можно образование обедненного слоя, необходимо конкретизировать ситуацию. Для определенности предположим, что обкладки конденсатора созданы из полупроводника *p*-типа, т. е. реализуется условие $i \ll 1$. Пусть при умеренных приложенных напряжениях в приповерхностном слое одной из полупроводниковых обкладок происходит обеднение электронами, в другой — их накопление. Падение приложенного напряжения в основном имеет место на обедненном слое, так что для дифференциальной емкости можно получить выражение

$$C = \frac{S \varepsilon_n}{8\pi L_i \lambda^{1/2}} \left(\frac{kT}{e\varphi} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

Это реализуется в условиях

$$i \exp \left(\frac{e\varphi}{kT} \right) \ll \frac{e\varphi}{kT}, \quad \frac{\varepsilon_n}{8\pi L_i \lambda^{1/2}} \left(\frac{kT}{e\varphi} \right)^{\frac{1}{2}} \ll \frac{\varepsilon_s}{d}. \quad (4)$$

С дальнейшим увеличением приложенного напряжения на одной из обкладок возможно формирование инверсного слоя. Тогда напряжение в основном падает на область зазора, и для дифференциальной емкости получим выражение

$$C = \frac{S \varepsilon_g}{4\pi d}. \quad (5)$$

В условиях применимости (1), (3) и (5) протекающие в структурах МДП и ПЗП физические процессы заметным образом не отличаются. В обоих случаях емкостью структуры с помощью приложенного напряжения можно управлять. Однако, если зазор между полупроводниками заполнить материалом с очень большим значением диэлектрической проницаемости, то определяемые формулами (1) и (5) верхние предельные значения емкости ПЗП-структуры могут значительно превысить аналогичные значения МДП-структуры. В качестве такого материала могут быть предложены растворимые в воде сегнетоэлектрики (например, сегнетова соль), которыми легко можно заполнить зазор. Что же касается нижнего предельного значения емкости, то в обеих структурах оно одинаково и определяется максимальным значением ширины обедненного слоя. В большей величине емкости ПЗП-структуры можно убедиться с помощью следующего численного примера. Обычно в роли диэлектрика в МДП-структуре выступает SiO_2 с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_s = 4$ и толщиной $d = 50$ нм. В ПЗП-структуре зазор заполним, например, материалом с $\varepsilon_s = 10^3$. Даже при значительно большей толщине зазора ($d = 1$ мкм) в случае кристалла кремния с $p_0 > 10^{17} \text{ см}^{-3}$ верхние предельные значения управляемой дифференциальной емкости предлагаемой структуры на порядок превысят аналогичные значения МДП-структуры. Указанная возможность варьирования величиной емкости в более широких пределах имеет принципиальное значение для создания на основе ПЗП-структуры параметрических генераторов и усилителей электромагнитных колебаний.

Емкостью ПЗП-структуры можно управлять также с помощью светового излучения. Если световая волна поглощается в приповерхностной области полупроводниковых обкладок, то это приводит к изменению концентрации носителей. Тогда за счет изменения дебаевской длины экранирования изменится также емкость структуры. Указанное явление наиболее четко проявится в собственных полупроводниках, в условиях применимости (1). Понятно, что ПЗП-структуру можно использовать также в качестве оптического детектора. Учитывая конструкционные особенности исследуемой структуры, созданный на ее основе детектор излучения может быть особенно эффективен в волоконно-оптических системах связи. Так как оптимальная длина волны для кварцевых оптических волокон составляет 1,55 мкм, то для того, чтобы обеспечить квазиволноводный режим распространения излучения по зазору, его толщина должна быть величиной этого же порядка ($d=2$ мкм). С другой стороны, полупроводники, поглощающие излучение на такой длине волны, как правило, обладают относительно большим значением диэлектрической проницаемости и малым значением дебаевской длины экранирования (например, в Ge $\epsilon_n=16$, $L_d=0,68$ мкм). Из (1) следует, что при $\lambda=1$ структура может эффективно функционировать как оптический детектор лишь при условии $d/\epsilon_n \leq L_d/\epsilon_n$. Это означает, что в случае, когда в роли полупроводниковых обкладок выступает кристалл германия, диэлектрическая проницаемость заполняющего зазор оптически прозрачного в этом диапазоне материала должна быть не меньше 50. Используемые сегодня в МДП-электронике диэлектрические материалы имеют гораздо меньшие ϵ_d , использование же других материалов связано с решением больших технологических проблем.

До сих пор существованием заряда на поверхностных состояниях полупроводников или в заполняющем зазор диэлектрике пренебрегали. В ряде случаев учет этого обстоятельства приводит к изменениям, которые существенно не отражаются на описанных выше аспектах протекающих процессов. Тогда остается также в силе аналогия между ПЗП- и МДП-структурами. Однако возможна ситуация, когда из-за наличия заряда на поверхностных состояниях полупроводников исследуемая нами структура приобретает принципиально новые свойства.

Рассмотрим случай, когда ПЗП-структура образована из полупроводника n -типа. Пусть eN —плотность отрицательного заряда на поверхностных состояниях полупроводниковых обкладок, зависимостью которой от приложенного напряжения можно пренебречь. В таких условиях в приповерхностных областях полупроводниковых обкладок возможно образование обедненных слоев (энергетические зоны искривляются вверх). Приложенное напряжение уменьшает толщину обедненного слоя в одной из полупроводниковых обкладок и увеличивает в другой. При этом специфичность ситуации заключается в том, что, как показывают расчеты, сумма толщин обедненных слоев обеих полупроводниковых обкладок не меняется, пока один из этих слоев не исчезнет. Иными словами, в области приложенного напряжения $\varphi < \varphi_0$.

емкость ПЗП-структуры остается постоянной величиной и определяется формулой

$$C = \frac{S}{4\pi} \left[\frac{d}{\epsilon_d} + 4 \left(\frac{L_i \lambda^{1/2}}{\epsilon_n} \right)^2 \frac{e^2 N}{kT} \right]^{-1}; \quad (6)$$

величина φ_0 определяется по формуле

$$\varphi_0 = \frac{enS}{4\pi C}. \quad (7)$$

Таким образом, в отличие от МДП-структуры при малых и умеренных значениях приложенного напряжения емкость ПЗП-структуры может оставаться постоянной величиной.

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, определяемого формулой (5).

Из (6) и (7) следует, что определив емкость исследуемой структуры, а также ту область, где она постоянна, можно определить значение плотности заряда на поверхностных состояниях полупроводников. Пусть в качестве полупроводниковых обкладок выступает кристалл кремния с параметрами $n_0 = 1.45 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $L_i = 24 \text{ мкм}$, $\epsilon_n = 12$, кроме того $d = 1 \text{ мкм}$ и $\epsilon_d = 1$. Нетрудно убедиться, что в области $N \gtrsim 10^{11} \text{ см}^{-2}$ определяемое формулой (6) значение емкости ПЗП-структуры существенно зависит от N .

Указанное обстоятельство позволяет обнаружить наличие не только газа, атомы которого адсорбируются поверхностью полупроводника, но и различные ионы в электролите при подборе соответствующей мембраны, размещаемые в зазоре. 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., но с этими явлениями научились бороться, в том числе технологическими методами (2,3). Техника скола может быть предложена и для изучения процессов в тугоплавных прозрачных полупроводниковых и диэлектрических ПЗП-структурах, идеальных и неидеальных гетеропереходах, в сложных каталитических системах и сенсорах. Возможна реализация на ПЗП-структурах различных тензо-, магнито-, радиационных и других сенсоров — всего комплекса чувствительных к изменению емкости, концентрации носителей заряда и температуры дискретных приборов и интегральных схем.

Կիսահաղորդիչ—ճեղք— կիսահաղորդիչ կառուցվածքի հատկություններն ու կիրառման հնարավորությունները

Հետազոտվում են ճեղքման միջոցով ստեղծված կիսահաղորդչային շրջադիրներով հարթ կոնդենսատորի ունակային բնութագրիչները, որի հիմնական առավելությունը որպես մեկուսիչ միջավայր զանազան ֆազային վիճակներում գտնվող տարրեր նյութերից ստեղծված բարակ շերտերի օգտագործման հնարավորությունն է: Ցույց է տրված, որ կառուցվածքի ունակությունը էապես կախված է կիրառվող լարումից, նրա վրա ընկնող օպտիկական ճառագայթման ինտենսիվությունից և մակերևութային վիճակներում կուտակված լիցքի խտությունից: Քննարկված են կիսահաղորդիչ—ճեղք—կիսահաղորդիչ կառուցվածքի հիման վրա կառավարվող ունակությամբ կոնդենսատորների, օպտիկական ճառագայթման դեդեկտորների, գազային ընկալիչների և այլ սարքերի ստեղծման հնարավորությունները:

ЛИТЕРАТУРА — ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

1 У. Тсанг, в кн.: Полупроводниковые инжекционные лазеры, Радио и связь, с. 213—320, 1990. 2 В. М. Арутюнян, Химические сенсоры, Изд. АрмНТИ, Ереван, 1992; Микроэлектроника, т. 20, в. 4, с. 337—355 (1991). 3 В. М. Арутюнян, в кн.: Фотокаталитическое преобразование солнечной энергии. Под ред. К. И. Замараева и В. Н. Пармона, Наука, Новосибирск, с. 228—291, 1991; в кн.: Фотоприемники и фотопреобразователи. Под ред. Х. И. Алферова и Ю. В. Шмарцева, Наука, Л., с. 253—287; 1986; УФН, т. 158, № 2, с. 255—291 (1989).