

К Р А Т К И Е С О О Б Щ Е Н И Я

УДК 537.331

© 1994

О ВОЗМОЖНОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ
РЕЛАКСАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ В СТРУКТУРЕ
ПОЛУПРОВОДНИК-ЗАЗОР-ПОЛУПРОВОДНИК

В.М. Арутюнян, Х.В. Неркарян

Технология, позволяющая с помощью скола создавать структуру из двух полупроводниковых кристаллов, которые отдалены друг от друга на расстояние меньше или порядка микрометра, разработана с целью изготовления полупроводниковых лазеров с составным резонатором [1]. При этом лицевые поверхности расположенных друг против друга кристаллов представляют собой плоскости спайности. Путем незначительного изменения технологии изготовления структуры полупроводниковые кристаллы можно изолировать друг от друга, создав тем самым плоский конденсатор с полупроводниковыми обкладками.

Существенное преимущество такого конденсатора от других аналогичных (например, МОП-структуры) заключается в возможности использования в качестве изолирующей среды самых разнообразных материалов в различных фазовых состояниях. Другая особенность предложенного конденсатора состоит в том, что благодаря малому зазору значение его емкости определяется также физическими параметрами полупроводниковых обкладок. Обозначим через ϵ_s и L соответственно значения диэлектрической проницаемости и дебаевской длины экранирования (либо толщины обедненного слоя) полупроводникового кристалла и через ϵ_I и d — значения диэлектрической проницаемости материала, заполняющего зазор и его толщину. При условии $\epsilon_s/L \lesssim \epsilon_I/d$ емкость конденсатора существенно зависит от параметров полупроводника. Нетрудно убедиться, что это условие легко реализуется для широкого класса полупроводниковых материалов и различных заполняющих зазор сред.

Наконец, отметим еще одно важное свойство исследуемой структуры — возможность создания сильных электрических полей в зазоре между полупроводниковыми обкладками. В условиях, когда падение напряжения между полупроводниковыми обкладками составляет несколько вольт, легко обеспечить напряженности электрического поля в зазоре порядка десятков kV/cm и выше. В результате этого проявятся различные нелинейные свойства заполняющей зазор среды.

В настоящей работе мы обсудим свойства указанной структуры в условиях, когда зазор между полупроводниковыми обкладками запол-

нен антисегнетоэлектриком. Важно то обстоятельство, что в антисегнетоэлектрических соединениях кривая зависимости диэлектрической поляризации от электрического поля в несимметричной фазе имеет S-образную форму. Заметим, что зазор особенно легко заполнять растворимыми в воде соединениями.

В зависимости от приложенного к полупроводниковым обкладкам напряжения в структуре полупроводник-антисегнетоэлектрик-полупроводник могут развиваться два принципиально разных нелинейных процесса. Первый из них обусловлен перераспределением носителей заряда в приповерхностных областях полупроводниковых обкладок и характерен для всех вариантов структуры полупроводник-зазор-полупроводник. Вторым — результат нелинейной зависимости диэлектрической поляризации антисегнетоэлектрика от напряженности приложенного поля. Рассматриваемая структура позволяет обрабатывать электрические сигналы — модулировать, усиливать, преобразовывать или запоминать. Указанными возможностями обладают также системы, в которых в отличие от обсуждаемой здесь проявляется лишь одного типа нелинейный процесс. Результатом же сочетания одновременно протекающих в структуре двух разных нелинейных процессов является возникновение релаксационных колебаний. Поэтому при определенных значениях приложенного постоянного напряжения структура полупроводник-зазор-полупроводник может находиться в неустойчивом состоянии, что приведет к колебаниям ее емкости и других параметров, характеризующих систему.

Пусть к полупроводниковым обкладкам структуры приложено напряжение φ . Заметим, что технологические особенности позволяют создавать структуру с полностью идентичными полупроводниковыми обкладками. Стандартным образом решая уравнение Пуассона и сшивая поля на границах раздела, получим следующую систему уравнений:

$$\frac{e\varphi}{kT} + Y_{s-} - Y_{s+} = \frac{eEd}{kT},$$

$$F(Y_{s\mp}) = \frac{\varepsilon_1 eEL_i}{\varepsilon_s kT}, \quad (1)$$

где

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

$$Y_{s\pm} = \frac{e(\varphi_{s\pm} - 1/2\varphi)}{kT}, \quad L_i^2 = \frac{\varepsilon_s kT}{8\pi e^2 n}, \quad \lambda = \frac{p_0}{n_i} = \frac{n_i}{n_0}. \quad (2)$$

Здесь φ_{s-} и φ_{s+} — значения потенциала в плоскостях раздела между полупроводниками и антисегнетоэлектриком; E — напряженность электрического поля в зазоре, заполненном антисегнетоэлектриком; 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; e — заряд электрона. Пренебрежем ролью поверхностных состояний, наличие которых в принципиальном плане не меняет ситуации.

Для определенности предположим, что обкладки конденсатора созданы из полупроводника n -типа, т.е. реализуется условие $\lambda \ll 1$. При умеренных приложенных напряжениях в приповерхностном слое одной

из полупроводниковых обкладок имеет место его обеднение электронами, а в другой — их накопление. Тогда в условиях

$$\frac{e\varphi}{kT} \gg 1, \quad \lambda^2 \exp\left(\frac{e\varphi}{kT}\right) \ll \frac{e\varphi}{kT} \quad (3)$$

из (1) получим следующее уравнение:

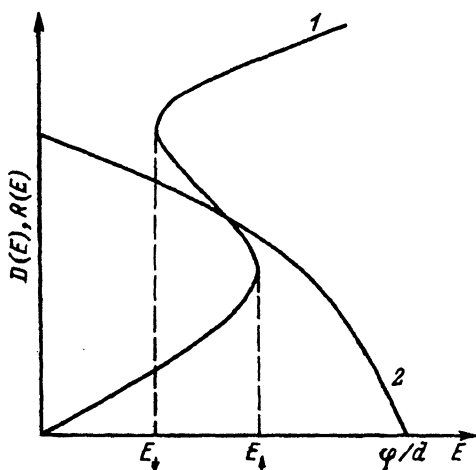
$$D(E) = R(E)$$

где

$$D(E) = \varepsilon_I(E)E, \quad R(E) = [8\pi\varepsilon_s e n_0 (\varphi - Ed)]^{1/2}. \quad (4)$$

Здесь D — величина электрической индукции в антисегнетоэлектрической среде.

На рисунке кривая 1 — типичная для антисегнетоэлектриков зависимость D от E . В области $E_1 < E < E_1$ он может находиться в двух устойчивых состояниях, которые характеризуются относительно малым и большим значениями диэлектрической проницаемости. Кривая 2 на рисунке определяет ход функции $R(E)$. Тогда точка пересечения кривых $D(E)$ и $R(E)$ является решением уравнения (4). Как видно из этого рисунка, определенным выбором параметров структуры и приложенного напряжения можно создать условия, когда ни одно из указанных устойчивых состояний $D(E)$ не реализуется и система находится в неустойчивом состоянии. Антисегнетоэлектрик не может находиться в устойчивом состоянии с малым значением диэлектрической проницаемости, поскольку в этом случае падение напряжения в основном имеет место в области зазора, где напряженность электрического поля больше E_1 . Однако антисегнетоэлектрик не может находиться также в устойчивом состоянии с большим значением диэлектрической проницаемости, поскольку в этом случае напряжение в основном падает на приповерхностную область одной из полупроводниковых обкладок (в обедненном слое), так что напряженность электрического поля в зазоре меньше E_1 .



Типичная для антисегнетоэлектриков зависимость электрической индукции D от напряженности электрического поля E (1) и функция $R(E)$ (2).

Точка пересечения кривых 1 и 2 является решением уравнения (4). В представленном случае система находится в неустойчивом состоянии.

Как известно в системах этого типа должны формироваться релаксационные колебания. Поскольку в окрестности точки фазового перехода время релаксации в антисегнетоэлектриках, как правило, значительно больше временных характеристик полупроводников, то период релаксационных колебаний можно определить с помощью кинетических уравнений модели Киттеля для антисегнетоэлектриков (см., например, [2]). Таким образом, при определенном значении приложенного постоянного напряжения структура полупроводник-антисегнетоэлектрик-полупроводник может находиться в неустойчивом состоянии, что приводит к колебаниям емкости и других параметров структуры.

Наличие нескольких легко варьируемых параметров способствует поиску исследуемого режима. Кроме параметра φ , величину которого можно изменять в широких пределах, ход кривой 2 существенно зависит также от диэлектрической проницаемости и степени легирования полупроводника, а также ширины зазора. Что же касается кривой 1, то ее форма определяется значением температуры, особенно в непосредственной окрестности точки фазового перехода.

В заключение отметим, что релаксационные колебания можно обнаружить в структуре полупроводник-антисегнетоэлектрик-металл. Однако простота изготовления методом скола структуры полупроводник-антисегнетоэлектрик-полупроводник существенно расширяет возможности обнаружения этих колебаний на эксперименте.

Список литературы

- [1] Тсанг У. // Полупроводниковые инжекционные лазеры. М.: Радио и связь, 1990. С. 213-320.
[2] Смоленский Г.А. и др. Физика сегнетоэлектрических явлений. Л.: Наука, 1985. 396 с.

Ереванский государственный
университет

Поступило в Редакцию
25 октября 1993 г.