

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 621.397.029.71/.73

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ СИГНАЛОВ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ СТРУКТУР МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИК-ПОЛУПРОВОДНИК

© 2004 г. Н. Ф. Ковтонюк, доктор техн. наук; В. П. Мисник, доктор техн. наук;
А. В. Соколов, канд. техн. наук

Центральный научно-исследовательский институт "Комета", Москва

Рассмотрены температурные характеристики формирователей сигналов инфракрасных изображений на структурах металл-диэлектрик-полупроводник в режиме неравновесного обеднения. Обсуждены возможности создания ИК фотомишенной видиконов, чувствительных в спектральном диапазоне 3,5–5,5 мкм.

Коды OCIS: 110.3080.

Поступила в редакцию 02.10.2003.

Для создания формирователей телевизионных сигналов изображений космических систем наблюдения в средней ИК области используются многоэлементные фоточувствительные структуры из узкозонных полупроводников с различными способами опроса элементов. Для улучшения обнаружительных свойств формирователей сигналов изображений (ФСИ) применяют глубокое охлаждение и накопление действия слабых сигналов. Однако бортовые устройства глубокого охлаждения до температур существенно ниже температуры жидкого азота во многих случаях неприменимы по условиям эксплуатации. Весьма актуальной является задача поиска фоточувствительных структур ФСИ, способных функционировать при технически приемлемых температурах.

В настоящем сообщении обсуждаются возможности решения этой задачи с использованием в ФСИ фоточувствительных структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП), работающих в режиме неравновесного обеднения. Такие структуры изготавливаются из полупроводников с концентрацией примесных носителей $\sim 10^{12} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$, и при воздействии на них импульсов напряжения в несколько десятков вольт начальная длина неравновесной обедненной области может достигать единиц и десятков микрон.

В полупроводнике с электронной проводимостью свободные заряды собираются у слоя диэлектрика, и в обедненной области остаются положительные заряды ионизованных примесных центров, линейные размеры этой области определяются по формуле

$$L = \sqrt{\epsilon_n U_n / en}, \quad (1)$$

где n – концентрация свободных носителей, U_n – напряжение на полупроводнике, ϵ_n – диэлектрическая проницаемость полупроводника, e – заряд электрона.

В структуре возникает термогенерационный ток: электроны отводятся полем пространственного заряда в сторону диэлектрика, а дырки – в противоположную сторону.

Переходный процесс длится до тех пор, пока образующиеся свободные заряды полностью закрывают объем полупроводника от электрического поля. Когда начальная толщина обедненного слоя L_0 меньше толщины полупроводника L_n и намного больше толщины диэлектрика L_d зависимость L от времени описывается выражением [2]

$$L(t) = L_0 - \frac{\epsilon_n L_d}{2\epsilon_d} \frac{G_T}{n} t, \quad (2)$$

где ϵ_d , L_d – диэлектрическая проницаемость и толщина диэлектрика, G_T – скорость термогенерации.

При других соотношениях толщин зависимости $L(t)$ имеют более сложный характер [1].

Структура чувствительна к свету до тех пор, пока сохраняется обедненное состояние, и при питании ее прямоугольными импульсами результат светового воздействия регистрируется либо по импульсу мгновенного фототока, или по приращению тока деполяризации. При регистрации по току деполяризации структура работает в накопительном режиме

и выигрыш в отношении сигнал/шум определяется отношением $(T/\tau)^{1/2}$, где T – время накопления, τ – длительность импульса деполяризации [3].

При регистрации суммарного мгновенного тока (I_r), вызванного термогенерацией носителей заряда (G_r), фотогенерацией фоновым излучением (G_ϕ) и сигналом (G_c),

$$I_r = eGL(t), \quad (3)$$

где $G = G_r + G_\phi + G_c$, шумы структуры определяются дробовым шумом, который описывается выражением

$$i_{ш.МДП} = \sqrt{2eI_r\Delta f} = \sqrt{2e^2GL\Delta f}, \quad (4)$$

где Δf – полоса частот.

В выражении (4) отсутствует шум тока равновесных свободных зарядов, так как они ранее уведены в приэлектродные области и не участвуют в формировании измеряемого сигнала. Считается, что остальными источниками шумов можно пренебречь.

На вышесказанное можно взглянуть под углом зрения повышения рабочей температуры МДП-фотоприемника при сохранении удельной чувствительности. Исходя из зависимости концентрации свободных носителей заряда от температуры, можно считать, что если удастся в полупроводнике МДП-структуры импульсом напряжения поддерживать некоторое время концентрацию ниже равновесной на несколько порядков, то рабочая температура таких приемников может быть несколько выше, чем у традиционных. В работе [4] приведена упрощенная формула для расчета рабочей температуры без учета детальных параметров слоев структуры. Если их учесть, то получим более точное выражение. Рассмотрим этот вопрос подробнее. При $L = 0$ из формулы (2) получается выражение для определения времени накопления t_n в зависимости от скорости термогенерации

$$t_n = 2\varepsilon_d n L_0 / \varepsilon_n L_d G_r. \quad (5)$$

В полупроводнике с полностью ионизированными примесными уровнями скорость термогенерации определяется выражением

$$G_r = n_i/\tau, \quad (6)$$

где n_i – концентрация свободных носителей заряда в собственном полупроводнике при заданной температуре T , τ – их время жизни.

Учитывая, что

$$n_i = N e^{-\Delta E/2kT}, \quad (7)$$

и задавая требуемое время накопления t_n , из соотношений (5)–(7) получим выражение для вычисления рабочей температуры фотомишени в зависимости от напряжения и параметров слоев структуры

$$T = \frac{\Delta E}{2k \ln \frac{t_n \varepsilon_n L_d N}{2\varepsilon_d n L_0}}. \quad (8)$$

Здесь ΔE – ширина запрещенной зоны, k – постоянная Больцмана, $N = \sqrt{N_c N_v}$; N_c , N_v – плотности состояний в зонах.

Так как L_0 в (8) зависит от напряжения на слое полупроводника, то рабочая температура может изменяться с изменением напряжения. Проведем оценку рабочей температуры по формуле (8) для МДП-структур из антимонида индия. $\Delta E = 0,18$ эВ, $L_d = 10^{-5}$ см, $N = 10^{17} - 10^{19}$ см $^{-3}$, $\varepsilon_n \approx \varepsilon_d = 10$, $n_0 = 10^{13} - 10^{14}$ см $^{-3}$, $L_0 = 10^{-4} - 10^{-3}$ см, $\tau \approx 10^{-7} - 10^{-6}$ с. Изменяя переменные в (8) в разумных пределах, получим, что рабочая температура может составлять 70–130 К.

При заданной температуре охлаждения неравновесная обедненная область МДП-структуры в области собственного поглощения реагирует на излучение так, как будто структура охлаждена до температуры полного вымораживания мелких примесных уровней. Это связано с тем, что ранее свободные носители были удалены из объема и они не участвуют в формировании измеряемого сигнала фототока.

Наиболее четко эта температурная особенность проявилась в МДП-фотомишенях ИК видиконов [4]. Уже созданы видиконы, чувствительные при температуре ~85 К в области 2,7–3,1 мкм, в которых фотомишень выполнена в виде МДП-структуры из арсенида индия с концентрацией примесей $\sim 10^{14} - 10^{15}$ см $^{-3}$. Для того чтобы фотомишень из фоторезистивной пленки арсенида индия с такой высокой проводимостью могла формировать рельеф изображения и имела высокую разрешающую способность, ее следовало бы охлаждать до 5–10 К. Здесь преимущество МДП-структуры очевидно. Однако в случае матричных формирователей изображений особо ярких преимуществ не просматривается, так как в матрицах разрешающая способность определяется размерами элементов, формируемых при фотолитографии. В подобной ситуации могут быть несколько выше рабочие температуры и ниже собственные шумы. Однако эти параметры еще надо сохранить при коммутации многоэлементных матриц, что сопряжено с определенными трудностями. Тем не менее, вопрос для дальнейших исследований остается.

В настоящее время наиболее приемлемым остается коммутация фоточувствительной МДП-структуры электронным лучом. В этом случае коммутационные шумы малы и незначительно тепловыделение в области фотослоя.

Уже созданы видиконы с МДП-фотомишенями, чувствительные в спектральной области 2,7–3,1 мкм.

Остается актуальной задача построения таких приборов, чувствительных в области 3,5–5,5 мкм.

Рассмотрим возможность построения формирователей сигналов изображения (видиконов), чувствительных в области 3,5–5,5 мкм, при приемлемых температурах охлаждения на основе МДП-структур из антимонида индия.

Результаты рассмотрения фоточувствительности таких структур представлены в работах [1, 2, 5]. Исследовались структуры из антимонида индия с концентрацией свободных носителей при 77 К $\sim 10^{12}$ – 10^{13} см⁻³. Толщина кристаллов 150 мкм. На полированные стороны пластин методом анодного окисления наносились диэлектрические слои окислов толщиной $\sim 0,1$ мкм, а затем напылялись серебряные электроды. К структуре прикладывались прямоугольные импульсы напряжения длительностью 10^{-5} – 2×10^{-3} с с амплитудой 5–20 В. Температура образцов 77 К. Начальная величина обедненного слоя, существенно меньшая толщины кристалла, составляла 5–40 мкм. Время существования фоточувствительного состояния (время накопления) ~ 100 – 1000 мкс. Плотность поверхностных состояний $\sim 10^{10}$ – 10^{11} см⁻². При наличии фоновой засветки время накопления уменьшалось в 5–10 раз. В накопительном режиме вольтовая чувствительность $\sim 10^5$ В/Вт. Время существования фоточувствительного состояния уменьшалось с ростом температуры, и при 95–100 К фоточувствительность исчезала. Допустимое отклонение рабочей температуры от температуры жидкого азота составляло 13 К. Рабочая температура несколько возрастала с ростом напряжения на структуре. Однако изменение температуры было незначительным (~ 10 К). Это связано с тем, что на структуры из антимонида индия

нельзя подавать большие напряжения, так как уже при напряжении 12–15 В в обедненной области возникает ионизация, ограничивающая ее величину и время накопления. Экспериментальные значения параметров структур в фоточувствительном состоянии позволяют считать, что на основе МДП-структур из антимонида индия могут быть созданы видиконы, чувствительные в диапазоне 3,5–5,5 мкм, с температурой охлаждения 77–80 К, временем накопления ~ 1000 мкс и с чувствительностью $\sim 10^{-7}$ Вт/см².

Подобные приборы могут создаваться на структурах из других полупроводников для других спектральных диапазонов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковтонюк Н.Ф. Электронные элементы на основе структур полупроводник–диэлектрик. М.: Энергия, 1976. 182 с.
2. Ковтонюк Н.Ф., Савков Г.Н. Затухание генерационного тока в структурах антимонид индия–окисел // Физика и техника полупроводников. 1975. Т. 9. В. 6. С. 1208.
3. Ковтонюк Н.Ф. Фоточувствительность идеального накопительного приемника на симметричных структурах полупроводник–диэлектрик // Физика и техника полупроводников. 1975. Т. 9. В. 12. С. 2386–2388.
4. Ковтонюк Н.Ф., Мисник В.П. Фотомишени на основе структур металл–диэлектрик–полупроводник для видиконов, чувствительных в средней инфракрасной области спектра // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. № 9. С. 1145–1148.
5. Ковтонюк Н.Ф., Морозов В.А., Савков Г.Н. Время существования глубокого обеднения в структурах антимонид индия–окисел // Тонкие диэлектрические пленки. 1973. Л.: Изд-во ЛПИ. С. 194–197.