

Кремниевый фотодиод с сетчатым $p-n$ -переходом

© В.И. Блынский[¶], Ю.Г. Василевский, С.А. Малышев, А.Л. Чиж

Институт электроники Национальной академии наук Беларуси,
220090 Минск, Республика Беларусь

(Получена 5 мая 2006 г. Принята к печати 15 июня 2006 г.)

Исследованы кремниевые фотодиоды, p -область которых имеет сетчатую структуру. Получены аналитические выражения для емкости таких фотодиодов. Проведен анализ влияния размеров ячейки и диффузионной длины неосновных носителей заряда на чувствительность кремниевого сетчатого фотодиода в спектральном диапазоне 0.6–1.0 мкм. Приведены экспериментальные характеристики фотодиодов с сетчатым $p-n$ -переходом с размерами ячеек 50 и 110 мкм. Обсуждены факторы, определяющие особенности их спектральной характеристики.

PACS: 85.60.Dw, 72.40.+w, 73.50.Pz.

1. Введение

В ряде областей техники, например для систем дистанционного управления аппаратурой, требуются кремниевые фотодиоды с большой фоточувствительной площадью ($> 2 \text{ мм}^2$), низкой емкостью и высокой чувствительностью в ближней инфракрасной области спектра (длина волны 0.85 и 0.95 мкм) [1]. Частично проблема уменьшения емкости фотоприемника решается формированием входного окна прибора в виде линзы, что позволяет уменьшить площадь фотодиода. Вторым эффективным методом является использование $p-i-n$ -фотодиодов. Однако в полной мере их достоинства проявляются при высоких напряжениях смещения, что в ряде случаев неприемлемо. Одним из возможных методов снижения емкости фотодиода является выполнение p -области $p-n$ -перехода в виде сетки [2,3]. В настоящей работе исследуются емкость и чувствительность кремниевых сетчатых фотодиодов в спектральном диапазоне 0.6–1.0 мкм.

2. Теоретическое исследование

Рассматриваемый в данной работе кремниевый планарный сетчатый $p-n$ -фотодиод состоит из подложки n -типа, в которой сформирована p^+ -область в виде сетки с квадратными ячейками.

2.1. Емкость сетчатого $p-n$ -фотодиода

Допуская, что боковые границы $p-n$ -перехода имеют цилиндрическую форму, емкость сетчатого $p-n$ -фотодиода можно выразить с помощью следующей формулы:

$$C = C_0 \left[1 - \frac{h_n^2}{(h_n + h_p)^2} + \frac{2\pi W/h_n}{\ln(1 + W/d)} \left(\frac{h_n}{l} + \frac{h_n^2}{(h_n + h_p)^2} \right) \right], \quad (1)$$

где $C_0 = \epsilon_0 \epsilon l^2 / W$ — емкость сплошного фотодиода, ϵ_0 — диэлектрическая постоянная, ϵ — диэлектрическая

проницаемость, l — ширина $p-n$ -перехода, h_n — ширина ячейки, h_p — расстояние между ячейками, W — ширина области пространственного заряда $p-n$ -перехода, d — глубина $p-n$ -перехода. Из (1) следует, что отношение емкости сплошного фотодиода к емкости сетчатого при условии $l \gg h_n$ выражается следующей формулой:

$$\frac{C_0}{C} \approx \left[1 - \frac{h_n^2}{(h_n + h_p)^2} \left(1 - \frac{2\pi W/h_n}{\ln(1 + W/d)} \right) \right]^{-1}. \quad (2)$$

Из формулы (2) следует, что уменьшение расстояния между ячейками h_p увеличивает выигрыш в емкости C_0/C (рис. 1). Соотношение (2) принимает максимальное значение в случае, когда расстояние между ячейками h_p значительно меньше ширины ячейки h_n :

$$\frac{C_0}{C_{h_p \ll h_n}} \approx \frac{\ln(1 + W/d)}{2\pi W} h_n. \quad (3)$$

Увеличение ширины ячейки и уменьшение расстояния между ними приводит к уменьшению емкости сетчатого $p-n$ -перехода при росте относительного вклада емкости боковых стенок $p-n$ -перехода.

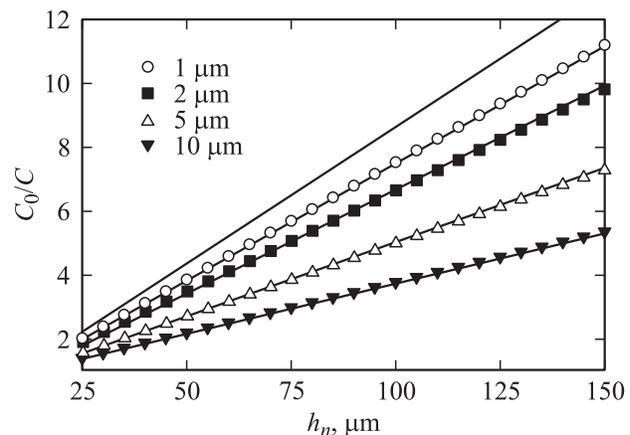


Рис. 1. Зависимость отношения емкостей C_0/C сплошного и сетчатого фотодиодов от размера ячейки h_n при разном расстоянии между ячейками h_p , рассчитанная по формуле (2) для $W = 1.5 \text{ мкм}$, $d = 1.2 \text{ мкм}$ (сплошная линия соответствует формуле (3)).

[¶] E-mail: blynski@bas-net.by

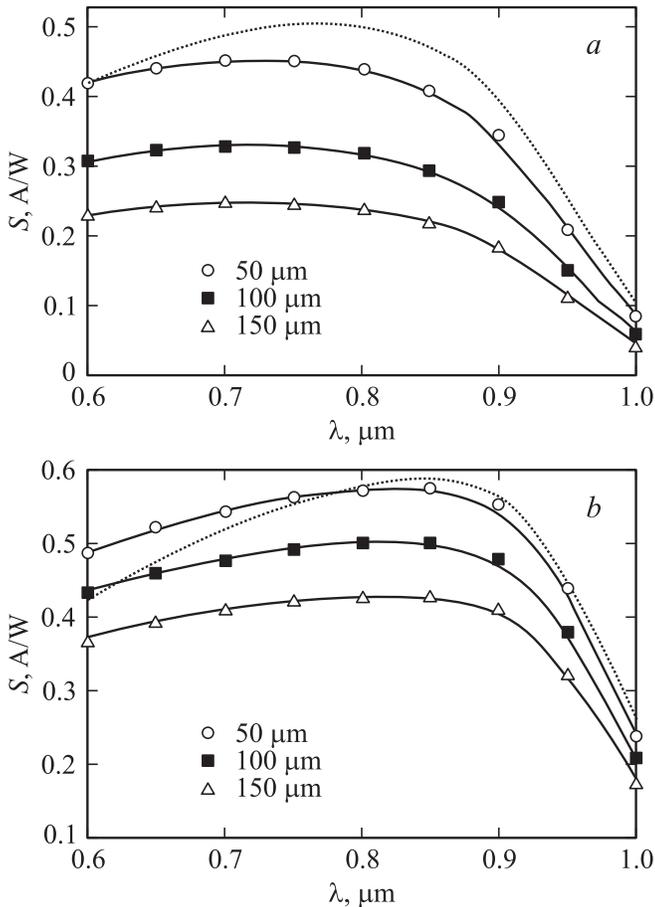


Рис. 2. Спектральная характеристика чувствительности фотодиода с сетчатой структурой при разных размерах ячейки h_n (пунктирная линия соответствует сплошному фотодиоду): *a* — диффузионная длина дырок 30 мкм, *b* — диффузионная длина дырок 100 мкм.

2.2. Чувствительность сетчатого $p-n$ -фотодиода

Для расчета спектральной характеристики чувствительности использовалась двумерная дискретная физико-топологическая модель фотодиода на основе дрейфово-диффузионной схемы описания переноса носителей заряда в полупроводниковой структуре [4,5]. Использование двумерной модели при решении данной трехмерной задачи возможно при допущении, что ячейки сетчатой структуры являются круглыми, что позволяет перейти к цилиндрической системе координат и моделировать поведение одной отдельно взятой ячейки. Следует отметить, что принятое допущение не влияет на выходные характеристики фотодиода в инфракрасной области спектра, так как глубина поглощения излучения в кремнии в исследуемом диапазоне спектра намного превышает глубину залегания $p-n$ -перехода.

Моделируемый кремниевый сетчатый фотодиод состоит из подложки n -типа толщиной 400 мкм с concentra-

цией донорной примеси $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и сформированной в ней p -области толщиной $d = 1.2$ мкм с концентрацией акцепторной примеси $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и расстоянием между ячейками $h_p = 10$ мкм. Коэффициент отражения света от поверхности фотодиода принимался равным нулю, а скорость поверхностной рекомбинации в p - и n -областях предполагалась 10^4 и 10^2 см/с соответственно. На рис. 2 представлена теоретически рассчитанная спектральная характеристика чувствительности фотодиодов в спектральном диапазоне 0.6–1.0 мкм для различных диффузионных длин неосновных носителей заряда и ширины ячейки.

Из рис. 2 видно, что в видимой области спектра чувствительность сплошного фотодиода может быть меньше чувствительности фотодиода с сетчатой структурой. При увеличении диффузионной длины дырок в подложке и уменьшении ширины ячейки спектральный диапазон, в котором чувствительность фотодиода с сетчатым $p-n$ -переходом превышает чувствительность сплошного фотодиода, расширяется в инфракрасную область спектра. Указанный диапазон может простирается до длины волны максимума спектральной чувствительности сплошного фотодиода.

3. Эксперимент

Экспериментальные образцы фотодиодов со сплошным $p-n$ -переходом и с $p-n$ -переходом, p -область которого выполнена в виде сетки с квадратными ячейками размером 50 и 110 мкм, были сформированы в кремнии КЭФ-4.5 (рис. 3). Размеры сплошного и сетчатого $p-n$ -переходов составляли 1.62×1.62 и 1.87×1.87 мм соответственно. Размеры последнего были больше, чтобы компенсировать предполагаемое уменьшение чувствительности сетчатого фотодиода в инфракрасной области спектра. Расстояние между ячейками составляло 10 мкм. $p-n$ -переходы глубиной 1.2 мкм формировались имплантацией бора без применения специальных технологических методов по увеличению диффузионной длины неосновных носителей заряда. Диффузионная длина дырок в подложке составляла 35–40 мкм.

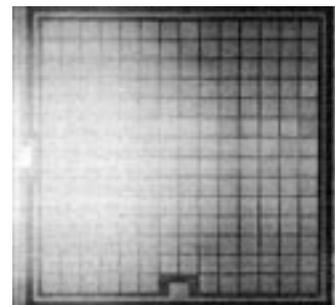


Рис. 3. Внешний вид топологии сетчатого фотодиода с размером ячейки 110 мкм.

Тип фотодиода	Размеры $p-n$ -перехода, мм	Емкость, пФ, ($U = 0$ В)	Фотосигнал ($\lambda = 0.95$ мкм), отн. ед.	Темновой ток, нА ($U = 5$ В)
Сплошной	1.62 · 1.62	180	1.0	< 1.0
Сетчатый ($h_n = 50$ мкм, $h_p = 10$ мкм)	1.87 · 1.87	166	1.2	< 1.0
Сетчатый ($h_n = 110$ мкм, $h_p = 10$ мкм)	1.87 · 1.87	125	0.9	< 1.0

На рис. 4 представлены измеренные спектральные характеристики чувствительности исследуемых фотодиодов. Видно, что чувствительность сетчатого фотодиода с размером ячейки 50 и 110 мкм в инфракрасной области спектра меньше чувствительности сплошного фотодиода на 15 и 30% соответственно, что соответствует теоретическим кривым, приведенным на рис. 2, а.

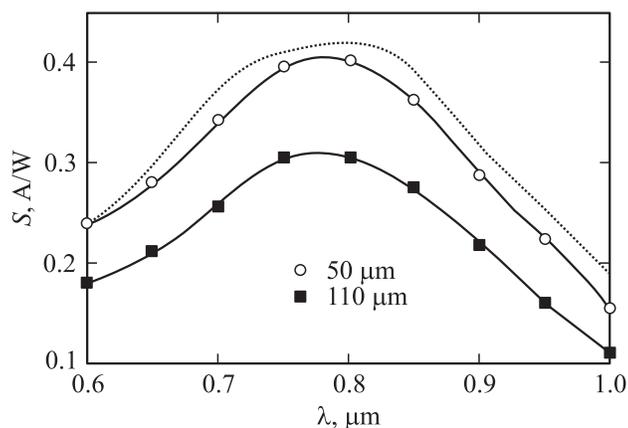


Рис. 4. Спектральная характеристика чувствительности сплошного (пунктирная линия) и сетчатых фотодиодов с размером ячейки 50 и 110 мкм.

Сравнительные параметры фотодиодов приведены в таблице. Как видно из таблицы, фотосигнал сетчатого фотодиода с размером ячейки 110 мкм при освещении оптическим излучением с длиной волны 0.95 мкм лишь на 10% меньше амплитуды фотосигнала сплошного фотодиода, при этом его емкость меньше в 1.5 раза.

4. Обсуждение результатов

По сравнению со стандартным фотодиодом в сетчатом фотодиоде появляются два дополнительных фактора, влияющих на чувствительность. Их возникновение связано с тем, что преобладающая часть излучения попадает в область ячеек.

Первый фактор обусловлен тем, что в сетчатом фотодиоде по сравнению с обычным фотодиодом рассто-

яние от места генерации дырок излучением в ячейках до $p-n$ -перехода увеличивается. Поэтому часть дырок вследствие влияния объемной рекомбинации не достигает перехода, что приводит к снижению чувствительности. Причем снижение чувствительности тем больше, чем больше ширина ячеек.

Второй фактор обусловлен тем, что вследствие малого количества дефектов скорость рекомбинационных процессов у границы раздела Si-SiO₂ в приповерхностной области ячеек меньше, чем в p -области кремния, подвергшейся имплантации. Поэтому вероятность того, что дырки, генерируемые оптическим излучением в приповерхностной области ячеек и диффундирующие туда из объема подложки, достигнут $p-n$ -перехода и дадут вклад в фототок выше, чем для электронов, генерируемых излучением в p -области фотодиода. Это приводит к тому, что чувствительность сетчатого фотодиода в видимой области спектра превосходит спектральную чувствительность сплошного фотодиода.

Первый из указанных механизмов доминирует преимущественно в инфракрасной области спектра, тогда как второй — в коротковолновой области спектра. Вид спектральной характеристики зависит от того, какой из них преобладает. Так, при большой диффузионной длине и малой ширине ячейки преобладание второго фактора может привести к превышению чувствительности сетчатого фотодиода по сравнению со сплошным фотодиодом даже в инфракрасной области спектра.

Превышение реального значения емкости (см. таблицу, рис. 1) по сравнению с расчетным значением объясняется тем, что в приведенной теоретической модели не учтена площадь, занимаемая контактом к p -области $p-n$ -перехода. Кроме того, следует учитывать, что при изготовлении фотодиода в окисле на фоточувствительной поверхности вследствие наличия в нем кислородных вакансий образуется положительный заряд. Процессы термообработки приводят к перераспределению легирующей примеси в кремнии и увеличению концентрации фосфора в приповерхностной области кремния [6,7]. Оба этих механизма приводят к сужению ширины области пространственного заряда в месте выхода сетчатого $p-n$ -перехода на поверхность кремния и увеличению его емкости.

Из приведенных экспериментальных данных следует, что даже при низкой диффузионной длине дырок в подложке (30 мкм) можно получить сетчатый фотодиод с меньшей емкостью при практически одинаковом фотосигнале по сравнению со стандартным фотодиодом.

5. Заключение

Показано, что особенности спектральной характеристики сетчатого фотодиода обусловлены влиянием двух конкурирующих факторов. Первый фактор обусловлен уменьшением вероятности собирания сетчатым $p-n$ -переходом дырок, генерируемых оптическим излучением в ячейках. Второй механизм обусловлен меньшей скоростью рекомбинационных процессов в приповерхностной области ячеек. Вид спектральной характеристики сетчатого фотодиода определяется взаимодействием указанных механизмов.

Теоретически показана и экспериментально подтверждена возможность создания сетчатых фотодиодов, у которых при меньшей емкости чувствительность в инфракрасной области спектра не уступает чувствительности фотодиодов со сплошным $p-n$ -переходом.

Список литературы

- [1] В.И. Блынский, Е.Г. Лозицкий, П.И. Окунь. Электрон. промышленность, **1**, 12 (2004).
- [2] Е.И. Иванова, Л.Б. Лопатина, В.Л. Суханов, В.В. Тучкевич, Н.М. Шмидт. ФТП, **15**, 1343 (1981).
- [3] В.И. Блынский. Докл. 9-й науч.-техн. конф. „Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления“ (Гурзуф, Украина, 1997) с. 256.
- [4] S. Malyshev, A. Chizh, Y. Vasileuski. Proc. 5th Int. Conf. Numerical Simulation Optoelectronic Devices (Berlin, Germany, 2005) p. 45.
- [5] Ю.Г. Василевский. Вестн НАН Беларуси. Сер. физ.-мат. наук, **5**, 35 (2005).
- [6] Интегральные схемы на МДП приборах (М., Мир, 1975) с. 68. [Пер. с англ.: *MOS Integrated Circuits*, ed. by W. Penny (N.Y.–Cincinnati–Toronto–London–Melbourne, Van Nostrand Reinhold Company, 1972) p. 68].
- [7] Кремниевые планарные транзисторы, под ред. Я.М. Федотова (М., Сов. радио, 1973) с. 210.

Редактор Л.В. Беляков

Silicon $p-n$ -photodiodes with a grid structure

V.I. Blynski, Y.G. Vasileuski, S.A. Malyshev, A.L. Chizh

Institute of Electronics,
National Academy of Sciences of Belarus,
220090 Minsk, Republic of Belarus

Abstract Silicon photodiodes with a p -region having a grid structure have been investigated. Analytical expressions describing the capacitance of these photodiodes have been obtained. An analysis of the cell dimension and diffusion length of the minority carrier influence on the sensitivity of silicon grid photodiode has been carried out in a spectral region of 0.6–1.0 μm . Measured characteristics of the grid photodiodes with 50 and 110 μm cell dimensions are presented. Spectral characteristic features of grid photodiodes have been discussed.